



UNITÉ DE RECHERCHE
INRIA-ROCQUENCOURT

Institut National
de Recherche
en Informatique
et en Automatique

Domaine de Voluceau
Rocquencourt
B.P. 105
78153 Le Chesnay Cedex
France
Tél.: (1) 39 63 55 11

Cell. 121

Rapports de Recherche

N° 1531

Programme 3

*Intelligence artificielle, Systèmes cognitifs et
Interaction homme-machine*

L'ÉVALUATION ET LA SÉLECTION DE SOLUTIONS DANS LA RÉOLUTION DE PROBLÈMES DE CONCEPTION

Nathalie BONNARDEL

Octobre 1991



Programme 3
Communication Homme-Machine

**L'ÉVALUATION ET LA SÉLECTION DE SOLUTIONS
DANS LA RÉOLUTION DE PROBLÈMES DE CONCEPTION**

Evaluation and selection of solutions in problem solving for design

Nathalie BONNARDEL

Septembre 1991

Ce rapport a été rédigé dans le cadre d'une recherche réalisée par le Projet de Psychologie Ergonomique de l'INRIA, et financée en partie par L'AEROSPATIALE (contrat n° 1 88 D213 00 21123 012).

L'ÉVALUATION ET LA SÉLECTION DE SOLUTIONS DANS LA RESOLUTION DE PROBLÈMES DE CONCEPTION

Résumé: L'étude de type expérimental, présentée dans ce rapport, vise à caractériser l'activité d'évaluation et de sélection de solutions, dans un contexte de conception de produits aérospatiaux*. Différents types de problèmes de conception (traditionnel et nouveau) sont présentés à des concepteurs. Il leur est demandé d'évaluer les solutions associées à chacun de ces problèmes (solutions physiques et solutions conceptuelles) et de sélectionner celle(s) qu'ils jugent préférables. Les concepteurs, sujets de l'expérience, se différencient par leur niveau d'expertise dans le domaine de chacun des problèmes proposés et par leur type d'expertise. Cette différenciation permet d'appréhender les effets de l'expertise sur:

- les stratégies d'évaluation et de sélection de solutions,
- les similitudes exprimées entre les solutions,
- les solutions sélectionnées,
- les critères et les contraintes utilisés en tant que référents pour l'évaluation et la sélection de solutions.

Ce dernier thème - critères et contraintes - est approfondi afin de fournir une définition distinctive de ces termes. Cela nous permet de suggérer un mode d'organisation des connaissances évaluatives détenues par les experts en conception.

Les stratégies, les critères, et les contraintes identifiés dans cette étude sont susceptibles de contribuer au développement de systèmes d'aides à la conception, adaptables au niveau et au type d'expertise des utilisateurs.

Mots-clés : Résolution de Problèmes, Conception, Evaluation, Sélection, Critères, Contraintes, Systèmes d'aide.

EVALUATION AND SELECTION OF SOLUTIONS IN PROBLEM SOLVING FOR DESIGN

Abstract : The experimental study, presented in this paper, aims to characterize evaluation and selection activities when applied to design solutions, in an aerospace context*. Designers were presented with different kinds of design problems (traditional and new); each problem was associated with a set of solutions. Designers were asked to evaluate these solutions (physical and conceptual) and to select the one(s) they prefer. Designers, subjects of the experiment, are distinguished by their level of expertise in the domain of each proposed problem and by their type of expertise. This differentiation allows the determination of effects of expertise on:

- evaluation and selection strategies,
- similarities expressed between solutions,
- selected solutions,
- criteria and constraints used as referents for evaluating and selecting solutions.

The last topic - that of criteria and constraints - is deepened in order to provide a distinctive definition of these terms. It allows us to make some suggestions about the organization of evaluative knowledge held by experts in design.

Strategies, criteria, and constraints identified in this study may contribute to develop design support systems adaptable to the users' level and type of expertise.

Key-words : Problem Solving, Design, Evaluation, Selection, Criteria, Constraints, Support Systems.

* Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un contrat avec l'Aérospatiale.

* This study was conducted under a contract with Aérospatiale.

Remerciements

Mes remerciements aux concepteurs (chefs de service, calculateurs et dessinateurs) qui ont participé à ce travail et m'ont accueillie avec gentillesse au sein du bureau d'étude TM/E de l'Aérospatiale des Mureaux.

Je remercie vivement Pierre Falzon pour la pertinence de ses conseils et sa patiente collaboration lors de la rédaction de ce rapport.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
1 La résolution de problèmes de conception: un cadre d'étude des processus d'analyse, d'évaluation et de sélection.....	1
2 Les procédures d'évaluation et leurs résultantes.....	3
2.1 Les procédures évaluatives.....	3
2.1.1 L'évaluation au cours de la génération de solutions.....	3
2.1.2 L'évaluation à l'issue de la génération de solutions.....	4
2.2 Les résultantes de l'évaluation.....	8
2.2.1 Les résultantes de l'évaluation au cours de la génération de solutions.....	8
2.2.2 Les résultantes de l'évaluation à l'issue de la génération de solutions.....	9
3 Les référents de l'évaluation: critères et contraintes.....	11
3.1 Les critères.....	11
3.2 Les contraintes.....	12
3.2.1 L'origine des contraintes.....	12
3.2.2 La structure des contraintes.....	13
3.2.3 Les fonctions des contraintes.....	13
3.3 L'importance attribuée aux contraintes et aux critères.....	14
SITUATION EXPERIMENTALE.....	16
1 Constitution des problèmes et de leurs solutions.....	16
2 Procédure.....	17
2.1 Les sujets de l'expérience.....	17
2.2 L'ordre de présentation des problèmes.....	18
2.3 La passation de l'expérience.....	19
3 Validité de la situation expérimentale.....	20
RESULTATS.....	24
1 L'évaluation de solutions.....	24
1.1 Type de problème et ordre de traitement des solutions.....	25
1.2 Les stratégies d'évaluation de solutions.....	25
1.2.1 Les stratégies d'évaluation pour le problème traditionnel.....	25
1.2.2 Les stratégies d'évaluation pour le problème nouveau.....	27
1.2.3 Discussion.....	28
1.3 L'expression de similitudes entre solutions.....	29
1.3.1 L'identification de similitudes entre solutions.....	29
1.3.1.1 L'identification de similitudes pour le problème traditionnel.....	29
1.3.1.2 L'identification de similitudes pour le problème nouveau.....	30
1.3.2 Les dimensions sous-jacentes aux similitudes.....	31
1.3.2.1 Les dimensions sous-jacentes aux similitudes pour le problème traditionnel.....	31
1.3.2.2 Les dimensions sous-jacentes aux similitudes pour le problème nouveau.....	33
1.3.3 Le traitement des solutions.....	34
1.4 Eléments de modélisation.....	35
1.4.1 Les étapes de la réalisation de la tâche.....	35
1.4.2 Les caractéristiques de l'évaluation de solutions.....	36
2 La sélection de solutions.....	38
2.1 Les stratégies de sélection de solutions.....	39
2.1.1 Stratégies de sélection pour le problème traditionnel.....	39
2.1.2 Stratégies de sélections pour le problème nouveau.....	40
2.2 Les solutions sélectionnées.....	42

2.2.1 La quantité de solutions sélectionnées.....	42
2.2.2 La diversité des solutions sélectionnées.....	43
2.2.2.1 Les solutions sélectionnées pour le problème traditionnel.....	43
2.2.2.2 Les solutions sélectionnées pour le problème nouveau	46
2.2.3 Les justifications des solutions sélectionnées.....	47
3 Les critères et les contraintes évoqués.....	54
3.1 Analyse quantitative.....	54
3.1.1 Hypothèse.....	54
3.1.2 Influence du type d'expertise des concepteurs et de leur niveau d'expertise dans le domaine	55
3.2 Analyse qualitative.....	56
3.2.1 Ajout d'attributs évaluatifs.....	56
3.2.2 Les attributs évaluatifs utilisés: critères et contraintes.....	57
3.2.2.1 Critères conceptuels et contraintes opérationnelles	57
3.2.2.2 Généralité et spécificité des attributs évaluatifs.....	60
3.2.2.2.1 Les attributs évaluatifs spécifiques.....	61
3.2.2.2.2 Les attributs évaluatifs communs.....	62
3.2.2.3 Critères destructifs et critères de classement.....	62
3.4 Un réseau de critères et de contraintes.....	63
CONCLUSION	68
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	70
ANNEXES.....	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Groupes de sujets appariés.....	18
Figure 2 :	Neutralisation de l'ordre de présentation des solutions du problème Rf.R.	19
Figure 3 :	Schématisation de la démarche des concepteurs	36
Figure 4 :	La stratégie de sélection 2 et ses variantes.....	41
Figure 5 :	Etapas de sélection de solutions pour le problème traditionnel.....	51
Figure 6 :	Etapas de sélection de solutions pour le problème nouveau.....	52
Figure 7 :	Trois niveaux d'abstraction (critères, contraintes, représentation du problème et de la solution.....	64
Figure 8 :	Relations entre critères, contraintes, spécifications et éléments de solution	65
Figure 9 :	Liens entre critères et/ou contraintes	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	L'effet du type d'expertise des concepteurs sur les stratégies mises en œuvre après un délai d'adaptation	26
Tableau 2 :	L'effet du niveau d'expertise dans le domaine sur les stratégies mises en œuvre après un délai d'adaptation.....	27
Tableau 3 :	Stratégies d'évaluation et moment d'expression des similitudes entre solutions.....	30
Tableau 4 :	L'influence du type d'expertise des concepteurs et de leur niveau d'expertise dans le domaine sur l'expression de similitudes entre les solutions du problème nouveau	31
Tableau 5 :	L'effet du type d'expertise des concepteurs et de leur niveau d'expertise dans le domaine sur les dimensions sous-jacentes aux similitudes exprimées à propos des solutions du problème traditionnel	32
Tableau 6 :	L'effectif de concepteurs mettant en œuvre les stratégies de traitement des solutions et les dimensions sous-jacentes aux similitudes qu'ils expriment	33
Tableau 7 :	Comparaison des principaux résultats obtenus avec le problème traditionnel et avec le problème nouveau	34
Tableau 8 :	L'effet du type et du niveau d'expertise sur les stratégies de sélection de solutions pour le problème traditionnel.....	39
Tableau 9 :	L'effet du type et du niveau d'expertise sur les stratégies de sélection de solutions pour le problème nouveau	40

Tableau 10 : L'effet du type de problème sur la diversité des solutions sélectionnées (par rapport au nombre de solutions proposées).....	43
Tableau 11 : L'effet du type de travail et du niveau d'expertise sur la sélection de solutions du problème ACU.....	44
Tableau 12 : L'effet du type de travail et du niveau d'expertise sur la sélection de solutions du problème Rf.R.	46
Tableau 13 : Effectif de concepteurs et arguments évoqués pour justifier la sélection de solutions pour le problème traditionnel.....	49
Tableau 14 : Effectif de concepteurs et arguments évoqués pour justifier la sélection de solutions pour le problème nouveau	50
Tableau 15 : L'influence du type et du niveau d'expertise dans le domaine sur le nombre moyen de critères cités, dans le cadre du problème traditionnel	55
Tableau 16 : L'influence du type et du niveau d'expertise dans le domaine sur le nombre moyen de critères cités, dans le cadre du problème nouveau.....	55
Tableau 17 : L'effet du type de problème sur l'effectif de concepteurs citant les critères et les contraintes.....	58

INTRODUCTION

Un mode d'aide informatisée à l'activité consiste à générer une solution et à l'indiquer directement à l'opérateur. Cette démarche est sujette à des critiques portant sur la fiabilité de la proposition générée et sur le rôle trop directif du système.

Une autre approche s'avère plus appropriée: évaluer la proposition de l'opérateur, la critiquer et l'aider à choisir une proposition optimale. Cette approche est mise en œuvre dans certains systèmes d'aide et notamment dans les "systèmes experts critiques". Plusieurs difficultés se présentent alors: comment évaluer la proposition de l'utilisateur, comment sélectionner une proposition optimale et sur quelles bases ?

Etudier les processus d'évaluation et de sélection mis en œuvre par des humains peut contribuer à résoudre ces difficultés et en particulier:

- permettre de tester la validité des composantes évaluatives et sélectives des systèmes experts critiques;
- apporter des indications sur la façon dont les systèmes devraient fournir des explications aux utilisateurs;
- aider à l'élaboration des systèmes experts critiques.

Cette étude, susceptible de contribuer à l'approche des systèmes experts critiques, s'inscrit dans le champ des travaux sur la conception. Aussi verrons-nous tout d'abord l'intérêt qu'offre ce domaine pour l'étude d'activités d'évaluation et de sélection de solutions. Différents travaux de Psychologie Cognitive et d'Intelligence Artificielle, ainsi que certains systèmes d'aide informatisés intégrant des composantes évaluatives et sélectives, seront ensuite présentés. Les critères et les contraintes, référents des activités d'évaluation et de sélection, seront finalement décrits.

1 LA RESOLUTION DE PROBLEMES DE CONCEPTION: un cadre d'étude des processus d'analyse, d'évaluation et de sélection

La résolution de problèmes de conception constitue une situation intéressante pour appréhender certains processus de jugement. Elle recourt en effet à l'analyse, à l'évaluation et à la sélection de solutions à plusieurs moments:

- a - Les données initiales du problème de conception ne permettent pas au concepteur de se représenter le but de façon détaillée ou dans les termes de la réalisation du but. Cette caractéristique contribue au qualificatif de "mal défini" ou "mal structuré" qui s'applique, notamment, aux problèmes de conception (Simon, 1973). Résoudre le problème de conception consiste alors à changer de représentation. Il peut s'agir de:

- passer d'une représentation inadéquate (i.e. qui attribue à la tâche des propriétés qu'elle n'a pas) à une représentation adéquate;
- passer d'une représentation incomplète (i.e. qui n'attribue pas à la tâche toutes les propriétés nécessaires à sa réalisation) à une représentation complète (Hoc, 1987);
- passer d'un niveau de représentation à un autre (i.e. changer de "point de vue"), ce qui permet au concepteur de fixer son attention sur une seule contrainte à la fois (cf. Korf, 1980).

Ces changements de représentation sont primordiaux pour la résolution de problèmes ("much problem solving effort is directed at structuring problems, and only a fraction of it at solving problems once they are structured", Simon, 1973, p. 187) et nécessitent une analyse approfondie du problème (de ce qui est demandé, de ce qui peut être envisagé, etc.).

b - Le concepteur ne dispose pas de méthodes de résolution pré-établies. Cependant certaines procédures d'exécution et stratégies qu'il a utilisées lors de résolutions antérieures de problèmes peuvent être applicables à des parties du problème. Le concepteur doit donc déterminer celles qu'il peut appliquer et évaluer les actions à entreprendre à un moment donné de sa tâche.

c - Le concepteur ne parvient pas d'emblée à la solution finale. Il développe une solution restreinte ou associe plusieurs éléments de solution (ou solutions partielles). L'évaluation intervient tout au long de l'activité de conception pour juger la solution en cours de développement ou les solutions partielles.

d - Il n'existe pas une seule bonne solution pour résoudre le problème. Ce fait confère à l'évaluation en conception un statut particulier, différent des jugements vrai-faux.

e - Une conséquence de la caractéristique précédente est que des concepteurs différents parviennent, pour un même problème, à des solutions différentes.

f - Lorsque les concepteurs travaillent collectivement, plusieurs solutions sont envisagées pour un problème donné. Résoudre le problème signifie alors restreindre cet ensemble de solutions. L'évaluation intervient donc aussi lors du choix de solutions afin de sélectionner la solution "la plus satisfaisante".

Une hypothèse explicative (que nous essaierons de valider) des divergences décrites en (e) et (f) est la suivante: les concepteurs se réfèreraient à des critères différents ou affectés d'un poids différent. Ce qui se manifesterait par:

- la focalisation de l'attention sur certaines données du problème au détriment d'autres;

- la variabilité des actions entreprises, des méthodes de résolution mises en œuvre et des solutions sélectionnées.

La mise en œuvre d'activités évaluatrices et sélectrices dans les tâches de conception est maintenant reconnue. Plusieurs travaux ou systèmes, de Psychologie Cognitive ou d'Intelligence Artificielle, en rendent compte. Ils seront évoqués au cours d'une description des processus impliqués dans l'évaluation. Les référents de l'évaluation et de la sélection de solutions (i.e. les contraintes et/ou les critères) seront ensuite définis.

2 LES PROCEDURES D'EVALUATION ET LEURS RESULTANTES

Différentes acceptions du processus d'évaluation de solutions sont tout d'abord présentées. Les résultantes de l'évaluation sont ensuite décrites.

2.1 Les Procédures Evaluatives

L'évaluation de solutions intervient à différents moments de l'activité de conception et sous des formes variées. Plusieurs procédures évaluatives ont été identifiées dans des descriptions de l'activité évaluatrice développée par des "résolveurs humains" et par des systèmes d'aides à la décision. Ces procédures vont être décrites au sein de phases importantes de l'activité de conception: au cours de la génération de solutions et à l'issue de la génération.

2.1.1 L'évaluation au cours de la génération de solutions

Plusieurs études rendent compte d'une activité d'évaluation associée à la génération de solutions. L'activité évaluatrice y est décrite sous différentes formes:

- a) Discuter des propriétés de la solution envisagée et apprécier si elle satisfait certains buts et exigences*

Cette procédure a été proposée par Malhotra, Thomas, Carroll et Miller (1980) à la suite d'une étude de dialogues client-concepteur et de deux études expérimentales (l'une sur la conception d'un restaurant, l'autre sur la conception de logiciels). Le processus évaluatif décrit par ces auteurs s'applique aux propriétés de la solution; il intervient après un processus d'élaboration du but ("goal elaboration") et se trouve intégré au processus de génération de solutions ("design generation").

b) Déterminer les différences entre l'état-courant et l'état-but

Cette façon de procéder est, à l'origine, mise en œuvre dans G.P.S. ("General Problem Solver" de Newell & Simon, 1972) au moyen d'une stratégie "moyen-fin". On la retrouve dans le modèle d'Adelson & Soloway (1988): dans le sous-but "EVAL" ("Evaluate Current Sketchy Model") lui-même intégré dans une composante dite "Goals and Operators", relative aux mécanismes sous-jacents aux processus de conception. La finalité de la procédure est la même pour ces différents auteurs: prendre des décisions sur la façon de réduire l'écart constaté entre l'état-courant et l'état-but.

c) Apprécier la compatibilité des caractéristiques des solutions avec des contraintes jugées pertinentes

Cette procédure d'appréciation de compatibilité a été identifiée notamment lors d'études d'activités de conception développées dans le domaine aérospatial (Bonnardel, 1989). Elle est décrite comme interagissant tout au long de la tâche avec le processus d'élaboration de solutions. Une particularité par rapport aux deux acceptions précédentes est qu'à la fois les buts, les exigences et les états-buts sont ici décrits en termes de contraintes (pertinentes). Ces trois acceptions se recoupent: les buts, qu'ils soient partiels et/ou finaux ("états-buts" selon, Newell & Simon ou Adelson & Soloway) et les exigences (selon Malhotra et al.) peuvent être définis sous la forme de contraintes (Bonnardel). Ces dernières permettraient donc de décrire les différents éléments que le concepteur prend en compte au cours de son activité. Le recours à ce type de descripteurs est corroboré par des travaux récents qui rendent compte des activités de conception en terme de satisfaction ou de gestion de contraintes (Verdret, 1989; Darses, 1990).

2.1.2 L'évaluation à l'issue de la génération de solutions i.e. orientée vers la sélection de solutions

L'évaluation à l'issue de la génération de solutions peut être conduite par le concepteur lui-même et/ou assistée par un système d'aide (du type "système expert critique"). Sa finalité est d'identifier la solution la plus satisfaisante lorsque plusieurs solutions ont été envisagées pour résoudre un même problème. Cette situation peut se rencontrer lors de la résolution collective d'un problème (des concepteurs différents proposant des solutions différentes) et lors de la résolution coopérative avec un système d'aide (lorsque le système non seulement "critique" la solution de l'utilisateur mais de plus lui suggère certaines solutions alternatives). Les systèmes experts critiques ont été particulièrement développés dans le domaine médical; aussi leurs procédures évaluatives s'appliquent-elles à des propositions de l'utilisateur sous la forme

de plans thérapeutiques. Certaines concordances entre l'évaluation développée par des "résolveurs" humains et celle mise en œuvre par les systèmes d'aide seront soulignées.

a) Réaliser une "analyse critique" des composantes des solutions et une "critique composite" de la solution

Bien qu'identifiées dans des contextes distincts, les procédures d'"analyse critique" et de "critique composite" peuvent être rapprochées de par leur finalité: l'émission de jugements (acceptabilité ou validité et optimalité ou préférence).

- L'"analyse critique des composantes d'une solution" (ou "critical analysis of solution components") a été proposée par Jeffries, Turner, Polson & Atwood (1981) pour rendre compte de l'activité de concepteurs de logiciels: elle permet de déterminer si un plan particulier constitue une bonne solution à un sous-problème.
- La procédure de "critique composite" permet de déterminer si la proposition de l'utilisateur d'un système d'aide (tel le système MYCIN de Clancey, 1977) peut être retenue. Cette proposition doit pour cela satisfaire plusieurs "tests" tels que l'appartenance à une liste de médicaments prescriptibles ou l'absence de contre-indications. Un aperçu plus détaillé des étapes mises en œuvre par le système MYCIN est présenté ci-après.

Les procédures considérées ("analyse critique" et "critique composite") permettent en outre d'effectuer une sélection parmi plusieurs alternatives:

- L'analyse critique intervient à l'issue de plusieurs étapes: une première étape de particularisation des schémas (guidant la compréhension), une seconde de récupération en mémoire (ou recouvrement) de solutions connues, et une troisième de génération de solutions alternatives. L'analyse critique s'applique à ces solutions alternatives pour sélectionner l'une d'elles.
- Le système MYCIN sélectionne certains plans thérapeutiques (contenus dans la base de connaissance) afin de les suggérer à l'utilisateur en tant que choix alternatifs.

Le "sélectionneur de thérapies" ("therapy selector", Clancey, 1977) intégré dans le système MYCIN (Shortliffe, 1976) effectue différentes étapes d'un algorithme de sélection:

--> ORGDRUG --> PROPOSED --> DRUGCLASS? --> PRESCRIBED
& RANK & COVERAGE?
& APPROVED?

(d'après Clancey, 1977)

A chaque composante est assignée une fonction précise:

- L'étape "Orgdrug" permet de vérifier que le médicament envisagé fait partie d'une liste de médicaments susceptibles d'être prescrits;
- Lors de l'étape "Rank", le rang de préférence du médicament est déterminé;
- L'étape "Proposed" a lieu si le médicament envisagé peut s'intégrer au traitement du patient; d'autres médicaments sont aussi sélectionnés afin d'être proposés en tant qu'alternatives (par exemple en second et troisième choix);
- Lors de l'étape "Drugclass", le système teste si le traitement peut inclure deux médicaments d'un même groupe (par exemple, le groupe des pénicillines);
- L'étape "Coverage" permet de tester si le traitement est applicable à tous les organismes ayant besoin de la thérapie;
- L'étape "Approved" consiste à rechercher d'éventuelles contre-indications au traitement (par exemple: réaction allergique);
- L'étape "Prescribed" est atteinte lorsque les étapes précédentes ont été satisfaites; le médicament est alors considéré comme faisant partie de ceux qu'il est possible de prescrire au patient.

Le fonctionnement du système présente un intérêt évident mais certains aspects demanderaient à être précisés: sur quelles bases le rang de préférence du médicament est-il déterminé? sur quelles bases les propositions alternatives sont-elles sélectionnées? Il s'agit là d'interrogations relatives aux critères auxquels le système se réfère à la fois lors des différentes étapes de l'algorithme de sélection et lors de la génération des explications fournies à l'utilisateur dans le cas de rejets ou, au contraire, de prescriptions de certains médicaments.

b) Catégoriser les objets sur des échelles qui correspondent à chacun des critères d'évaluation et combiner les évaluations obtenues pour chacun des critères

Ces deux procédures successives aboutissent à la production de "jugements qui situent un objet ou une situation sur une échelle ou par rapport à une norme" (Richard, 1990). Elles utilisent pour cela des informations relatives aux objets et aux situations et, surtout, des normes ou critères (dont le rôle dans les activités d'évaluation est là aussi confirmé).

c) Comparer la solution à une (des) solutions "types"

Ce mode d'évaluation est mis en œuvre par plusieurs systèmes experts critiques réalisés dans le domaine médical: ils comparent la proposition émise par l'utilisateur avec le(les) plans

thérapeutiques qu'ils jugent les plus satisfaisants. Leur comparaison peut porter sur différents aspects des propositions:

- Ils peuvent comparer de façon globale et approfondie la proposition de l'utilisateur avec celle du système. Ce mode d'évaluation a été développé dans ONCOCIN (Shortliffe et al., 1981). L'utilisateur (un médecin) fournit au système des données concernant le patient. ONCOCIN les utilise pour générer une proposition qu'il ne présente pas à l'utilisateur mais qu'il compare à celle de l'utilisateur. La proposition de l'utilisateur et celle du système sont représentées par des plans hiérarchiques traduisant les relations existant entre les composantes d'une proposition thérapeutique. Le système critique compare les composantes de chacun des plans hiérarchiques en allant de la composante la plus générale (i.e. au plus haut niveau de la hiérarchie) vers les sous-composantes (démarche top-down à partir de chaque composante de haut niveau). Les composantes du plan de l'utilisateur qui diffèrent de celles du plan du système sont prises en compte pour fournir des explications à l'utilisateur (pour plus de détails, se référer à Langlotz & Shortliffe, 1983).
- Ils peuvent aussi comparer de façon plus spécifique les risques et les bénéfices de la proposition de l'utilisateur avec ceux de propositions alternatives. Cet objectif est atteint par le système ATTENDING (Miller, 1984) au moyen de plusieurs séquences d'opérations. Tout d'abord l'utilisateur entre sa proposition sous la forme de sélections dans un menu. Elle est ensuite traduite en un arbre structuré (P.A.T. ou "Proposed Approach Tree") qui explicite la hiérarchie de décisions et de sous-décisions prises par l'utilisateur pour formuler sa proposition. Cette proposition est analysée en se référant à une base de connaissance dite "réseau de décision augmenté" (A.D.N. ou "Augmented Decision Network"). Ce réseau est constitué d'états (représentant des composantes de la proposition thérapeutique) reliés par des arcs (correspondant aux différents choix possibles) auxquels est associée une liste de risques et de bénéfices. Cette prise en considération des différents choix envisageables permet de générer un nouvel arbre (A.T. ou "Alternative Tree") qui inclut la proposition de l'utilisateur et ses alternatives. L'évaluation intervient à ce niveau pour estimer les risques associés à la proposition de l'utilisateur et ceux associés aux propositions alternatives générées par le système. Le système compare alors les choix sous-tendant les diverses propositions en prenant comme indicateurs les risques qui leur sont associés.

Les systèmes ONCOCIN ET ATTENDING utilisent la même procédure, l'un pour approfondir les propositions, l'autre pour estimer les risques qui leur sont associés: ces systèmes approfondissent la première composante de haut niveau avant de passer à la composante de haut niveau suivante. Ils procèdent donc selon une démarche "en profondeur d'abord".

2.2 Les Résultantes de l'Evaluation

Les résultantes de l'évaluation varient selon le moment de la tâche:

- émission de jugements d'acceptabilité et focalisation de l'attention au cours de la génération de solutions,
- sélection de solutions après la génération de plusieurs solutions.

2.2.1 Les résultantes de l'évaluation au cours de la génération de Solutions

a) L'émission d'un jugement d'acceptabilité

Le jugement d'acceptabilité peut porter soit sur la solution finale, soit sur des solutions partielles (ou éléments de solutions) qui devront être associées pour constituer la solution finale. Ce jugement peut être décrit comme résultant d'une appréciation de la compatibilité des solutions avec certaines contraintes (Bonnardel, 1989):

- acceptabilité si la solution est compatible avec toutes les contraintes jugées pertinentes;
- acceptabilité provisoire si la solution est partiellement compatible avec les contraintes et que des améliorations doivent être apportées;
- non-acceptabilité si la solution est incompatible avec les contraintes pertinentes et doit être rejetée.

b) La focalisation de l'attention du concepteur

La focalisation de l'attention en tant que résultante de l'évaluation a été identifiée dans plusieurs études et est mise en œuvre dans certains systèmes d'aide à la décision.

- Dans le modèle d'Adelson & Soloway (1988), les différences entre l'état-courant et l'état-but sont relevées dans le cadre du sous-but "EVAL" ("Evaluate Current Sketchy Model"). Elles sont évaluées afin d'identifier les aspects qui doivent être mieux spécifiés dans la composante dite "Model", ce qui détermine la focalisation de l'attention du concepteur.

- L'orientation de l'attention du concepteur résultant de l'évaluation de la compatibilité des solutions avec des contraintes,

- les contraintes estimées non satisfaites lors de l'évaluation d'un élément de solution sont prises en compte soit pour améliorer cet élément de solution, soit (suite à son rejet) pour rechercher un autre élément de solution;
- les contraintes satisfaites par un élément de solution retenu sont analysées afin de définir d'autres contraintes (dites "déduites") susceptibles de s'appliquer à l'état de résolution du problème. Le concepteur va alors rechercher d'autres éléments de solutions afin de satisfaire ces nouvelles contraintes (Bonnardel, 1989).

... L'intervention du focus de l'attention se retrouve dans le système expert critique

ATTENDING, lors de la phase de sélection de solutions.

Des connaissances du domaine sont appliquées pour focaliser l'attention sur les alternatives les plus appropriées. Ce principe est mis en œuvre lorsque plusieurs approches ont obtenu la même grandeur de risques. Les connaissances se présentent sous la forme de règles dites de "préférence contextuelle". Elles permettent d'établir que dans le contexte d'un problème médical particulier, une technique spécifiée est préférable à une autre. Ces règles fournissent de plus la(les) raison(s) de cette préférence. Elles associent ainsi deux fonctions: focaliser l'attention sur certaines propositions et justifier la suggestion d'une approche plus intéressante que celle de l'utilisateur.

2.2.2 Les résultantes de l'évaluation à l'issue de la génération de solutions

Une autre résultante des processus évaluatifs dans les situations de conception est la sélection de solutions. Cet objectif apparaît difficile à atteindre lorsque la solution souhaitée doit satisfaire plusieurs critères et notamment des critères contradictoires. Cette sélection, dite "multicritère", repose sur une analyse complexe du contexte et des différentes solutions envisagées. Diverses techniques ont été proposées pour aider l'opérateur dans ses choix; certaines sont "manuelles" (conduites par l'opérateur), d'autres automatiques (conduites par un système d'aide). Les méthodes de sélection préconisées et les procédures mises en œuvre dans certains systèmes d'aide à la décision sont décrites ci-dessous.

a) Des méthodes "manuelles"

Il s'agit de méthodes mises en œuvre par l'opérateur pour faciliter l'analyse et la sélection de solutions.

- L'opérateur peut réaliser des matrices de décision: elles lui permettent de regrouper les différentes solutions, de les associer aux différents critères et ainsi d'appréhender les résultats de l'évaluation. Les différents critères sont ensuite "agrégés" afin d'obtenir des appréciations globales de chacune des solutions (cf. Lévine, P. & Pomerol, J.C., 1989 et Roy, B., 1985).
- L'opérateur peut aussi employer des méthodes qui permettent de situer les solutions les unes par rapport aux autres, en se référant à leur "note", rang ou classement. Ces différents indicateurs d'appréciation des solutions peuvent être obtenus à l'issue:
 - d'une pondération simple: un poids est affecté à chaque critère et la somme pondérée des notes obtenues sur chacun des critères, par chaque solution, est calculée;
 - d'une pondération sur les rangs (ou méthode de classement "à la Borga"): chaque solution est située par rapport aux autres pour chacun des critères et les rangs obtenus pour chaque solution sont additionnés;
 - d'un classement des couples de solutions; il s'agit, par exemple dans la méthode ELECTRE, d'un classement effectué en fonction de coefficients de concordance et de discordance.

Les solutions qui obtiennent les meilleures performances (sur la base de leur note globale, de leur rang global ou de leur classement) sont jugées les plus satisfaisantes et peuvent donc être sélectionnées par l'opérateur.

b) Des méthodes automatisées

Les systèmes d'aide à la sélection peuvent être plus ou moins directifs: certains décident des critères à prendre en compte et de leur importance relative (ou pondération), d'autres tiennent compte de l'avis de l'utilisateur. Deux systèmes sont représentatifs de tels fonctionnements: le système expert critique ATTENDING (Miller, 1984) et un système récent de sélection "multicritère" proposé par Boissier & Al-Hajjar (1990).

- Dans le système ATTENDING (Miller, 1984), la sélection de solutions dépend uniquement du système (sauf évidemment la sélection ultime par l'utilisateur). Elle repose sur une analyse des risques associés aux solutions. Les risques associés à la proposition de l'utilisateur et ceux associés à des choix alternatifs sont appréhendés et traduits en une valeur globale de risques, en appliquant des critères d'estimation globale. Quatre grandeurs de risque sont prises en compte par le système: bas, modéré, haut, extrême. Lorsqu'un choix ne présente aucun risque mais, au contraire, des avantages ou bénéfiques, cela est pris en compte sous la forme de "risques négatifs". La comparaison de deux choix s'effectue alors directement et permet d'éliminer le choix le moins intéressant. Une règle particulière est cependant appliquée lorsqu'il s'agit du choix de l'utilisateur: il est conservé même s'il est "inférieur" afin de servir de supports aux explications ultérieures.

Les principales étapes de cette démarche (i.e. la détermination de risques, l'élimination et la sélection de solutions) sont conduites indépendamment des utilisateurs.

- Dans le système de sélection "multicritère" de Boissier & Al-Hajjar (1990), la sélection s'appuie effectivement sur l'avis de l'utilisateur (cf. paragraphe 3.2.2). Ce système de sélection a été développé dans le cadre de la conception d'infrastructure des bâtiments.

On retrouve dans son fonctionnement deux des caractéristiques évoquées précédemment:

- L'application d'une opération d'agrégation (comme dans les méthodes de sélection manuelle), qui permet d'apprécier la compatibilité des solutions avec l'objectif global. Pour cela, l'opération d'agrégation combine les performances obtenues par chaque solution sur les objectifs partiels (liés à un(des) critère(s) et résultant d'une décomposition de l'objectif global).

Exemple: l'objectif partiel "stabilité" est associé au critère "portance", l'objectif partiel "coût" est associé au critère du même nom (il s'agit en particulier du "coût de construction").

- L'élimination progressive des solutions les moins satisfaisantes (comme dans ATTENDING), qui s'appuie sur le degré de compatibilité des propositions avec l'objectif global.

Dans ces deux systèmes automatisés, la sélection de solutions repose sur un nombre restreint d'aspects privilégiés. Dans le système ATTENDING (Miller, 1984), l'analyse porte uniquement sur les risques associés à une solution thérapeutique. Même dans le cas de l'analyse multicritère proposée par Boissier & Al-Hajjar (1990), les critères considérés sont en nombre limité et correspondent uniquement à des objectifs "concrets", explicités dans le domaine (ex: critères techniques et économiques), contrairement à des critères plus abstraits, non explicités et reposant sur l'expérience du concepteur (tels que l'élégance ou l'intérêt des solutions). L'appréciation de choix en se référant uniquement à des critères explicites dans le domaine nous semble trop limitative. Nous verrons au cours de l'expérience suivante en quoi le fonctionnement humain est plus complexe et sur quels critères il repose.

3 LES REFERENTS DE L'EVALUATION: CRITERES ET CONTRAINTES

Les notions de "critère" et de "contrainte" apparaissent souvent dans les descriptions d'activités de conception mais elles ne sont pas clairement caractérisées l'une par rapport à l'autre. Ces termes nous semblent cependant recouvrir des significations différentes et jouer un rôle précis dans l'activité du concepteur:

- Les "résolveurs" de problèmes "mal-structurés" (dont font partie les problèmes de conception) ne disposent pas au départ d'une représentation précise du but à atteindre. Ce n'est que progressivement, en définissant des contraintes, qu'ils se construisent une représentation du problème et ce faisant du but final.
- Lors des différents états de résolution du problème, les résolveurs envisagent une ou plusieurs solutions partielles. Afin d'en apprécier l'adéquation avec les caractéristiques des états de résolution, ils évaluent les solutions en se référant à des contraintes et à des critères. Le principal trait distinctif de ces deux notions (développé dans le chapitre 4) réside dans le fait que les critères sont de nature conceptuelle (ex: fiabilité) alors que les contraintes sont opérationnelles (ex: limiter le nombre d'éléments).
- Les contraintes interviendraient donc lors de la génération et de l'évaluation de solutions; les critères influeraient indirectement sur la génération de solutions mais pourraient intervenir directement lors de l'évaluation et de la sélection de solution.

3.1 Les critères

Les critères peuvent être définis en fonction du rôle qu'ils jouent au cours de la tâche de conception. Une distinction entre critères de fonctionnalité et critères d'évaluation peut ainsi être proposée.

- Les critères de "*fonctionnalité*" décrivent la fonction attendue du produit à concevoir. Ils sont spécifiés dans l'énoncé du problème et constituent une constante de la solution finale i.e.

quels que soient les éléments de solution envisagés par le concepteur, les effets définis par les critères de fonctionnalité devront pouvoir être obtenus (cf. Verdret, 1989).

Exemple: réflecteur reconfigurable -> "réflecteur dont le profil peut être modifié en orbite"⁰

• Les critères d'"évaluation" sont utilisés pour porter un jugement sur les solutions i.e. pour les qualifier comme satisfaisant ou non, ou satisfaisant plus ou moins, certains critères (ex: critères de coût, de masse, de versatilité...).

Certains critères peuvent être "personnalisés": les "critères d'évaluation préférés" (Guindon, 1990). Ils sont adoptés très tôt dans la démarche de résolution du problème et guident à la fois la recherche de solutions et la sélection d'une solution satisfaisante. Cet ensemble de critères personnalisés contribuerait en outre aux différences constatées entre experts et novices.

Différents types de critères d'évaluation ont été distingués en fonction de leur nature (Lévine, P. & Pomerol, J.C., 1989, p. 76):

- les critères *quantitatifs*, qui s'expriment naturellement par une échelle numérique (par exemple, en économie, le pourcentage pour les critères de "rentabilité" et de "croissance", le nombre d'années pour le critère de "temps de retour");
- les critères *qualitatifs*, qui doivent donner lieu à une fonction d'utilité (i.e. une échelle de valeurs numériques traduisant l'ordre qualitatif).

3.2 Les contraintes

La distinction proposée dans les définitions suivantes repose sur la prise en compte de plusieurs points de vue:

- leur origine,
- leur structure,
- leurs fonctions.

3.2.1 L'origine des contraintes

Trois types de contraintes ont été définis en fonction de leur origine (Bonnardel, 1989):

- les contraintes "prescrites", issues des spécifications du problème,

Exemple: "limiter le nombre d'actuateurs"

- les contraintes "construites", définies à partir de connaissances acquises lors du traitement de cas passés, et donc liées à l'expérience du concepteur,

Exemple: "limiter les risques"

- d'autres contraintes "dédouées", résultant de l'analyse des contraintes déjà définies ou de l'analyse de l'état de résolution du problème.

⁰ Les exemples de critères et de contraintes fournis dans ce paragraphe sont extraits des problèmes de conception abordés dans l'expérience qui va être présentée.

Exemple: "utiliser un matériau léger" est déduit de la contrainte "limiter la masse"

"limiter le nombre d'éléments" est déduit de "limiter les risques" et "limiter la masse"

La distinction de contraintes issues d'exigences spécifiées et de contraintes résultant d'autres formes d'analyses se retrouve chez Guindon (1990). Cet auteur définit des contraintes "inférées" qui peuvent être:

- déduites en raison d'une nécessité logique (notion recouverte par les contraintes déduites),
- inférées de spécifications informelles et de connaissances du domaine du problème (cf. l'acceptation accordée aux contraintes construites).

3.2.2 La structure des contraintes

Plusieurs auteurs, surtout dans le domaine de l'Intelligence Artificielle¹, s'accordent à décrire la structure des contraintes comme une relation associant des variables:

- "A constraint expresses a relationship among plan variables" (Stefik, 1981, p. 114),
- "A constraint imposes and maintains a relationship between some variables" (Berlandier, 1990, p. 167).

Les contraintes apparaissent ainsi comme des combinaisons de variables. Selon le nombre de variables mises en relation, les contraintes peuvent être unaires, binaires, ternaires...n-aires (Darses, 1990, p. 16).

3.2.3 Les fonctions des contraintes

L'importance accordée aux contraintes apparaît pleinement justifiée dès que l'on identifie leurs multiples fonctions dans la démarche de résolution de problèmes de conception:

• *Définir le problème*

Cette fonction des contraintes est reconnue par de nombreux auteurs et corroborée par des travaux récents. Par exemple, pour Guindon (1990), l'inférence de contraintes contribue à compléter et à réduire l'ambiguïté des spécifications.

De plus, grâce à leur rôle de descripteurs partiels d'un objet, les contraintes permettent de conserver l'information nécessaire pour différer les décisions - ce qui correspond à une stratégie dite de "moindre compromission" (ou "least-commitment", Stefik, 1981, p. 114).

• *Contrôler la génération de solutions appropriées au problème*

Cette fonction générale est assurée de plusieurs façons puisque les contraintes servent à la fois:

- d'orientateurs du focus de l'attention (Bonnardel, 1989), la recherche d'éléments de solution s'effectuant en fonction des contraintes à satisfaire;
- de règles d'élimination:

¹ Le fonctionnement de certains systèmes s'appuie sur cette structure et sur les propriétés qui lui sont associées (telles la propagation de contraintes, par exemple).

÷ les contraintes jouent le rôle de conditions à satisfaire lorsque les variables qu'elles lient ne sont pas encore délimitées, elles limitent ainsi les décisions possibles et permettent l'élimination de celles qui ne les satisfont pas (Stefik, 1981, p. 114);

÷ les contraintes contribuent à la structuration du problème et, ce faisant, diminuent l'espace des solutions possibles (Guindon, 1990).

- *Evaluer les solutions générées*

L'évaluation consiste alors en une appréciation de la compatibilité des solutions avec les contraintes jugées pertinentes - qui servent donc de "référents" (Bonnardel, 1989).

- *Servir de moyens de communication* pour exprimer des interactions entre sous-problèmes et ainsi coordonner les solutions qui leur sont apportées (Stefik, 1981, p. 115).

3.3 L'importance attribuée aux contraintes et aux critères

L'importance attribuée aux contraintes et aux critères varie en fonction de nombreux facteurs (problème considéré, état de résolution du problème, type de résolveur...), et différents statuts résultent de ces différences d'importance.

- *Contraintes de validité et contraintes de préférence* (cf. Janssen, Jégou, Nouguié & Vilarem, 1989)

Les contraintes de validité sont constituées de contraintes qui doivent obligatoirement être satisfaites par les solutions, et qui définissent donc les solutions admissibles.

Les contraintes de préférence sont quant à elles constituées de contraintes qui peuvent être satisfaites ou non par les solutions (ou plus ou moins satisfaites), et qui permettent de définir les solutions les plus souhaitables.

- *Variations de l'importance relative des contraintes de préférence*

L'importance attribuée aux contraintes peut résulter de la pondération qui leur est assignée: les contraintes les plus fortement pondérées sont privilégiées i.e. déterminent le choix de certaines solutions.

Cependant, lorsque plusieurs contraintes sont jugées importantes et qu'elles orientent vers des choix différents, des compromis deviennent nécessaires. Les compromis décidés par les concepteurs sont souvent différents, ce qui aboutit à des choix de solutions différentes². On peut à ce propos envisager l'action de "méta-contraintes" qui orienteraient ces compromis vers une décision ou une autre. Cette notion de "méta-contraintes" se retrouve chez Berlandier (1990) mais la définition qu'il en propose semble spécifique au maintien de la cohérence des réseaux de contraintes dans les systèmes d'Intelligence Artificielle: "meta-constraints provide an elegant and efficient mean to automatically adapt the lower level constraints to the changes that occur in the part hierarchy of the database" (ibid, p. 169).

² Pour des exemples de telles constatations, se référer aux travaux de Figéac-Letang, Bisseret & Falzon (1987) ou Bisseret, Figéac-Letang & Falzon (1988), dans le domaine de la conception de feux tricolores aux carrefours.

L'intervention de méta-contraintes en tant que composantes du "contrôle de l'activité" dans le cadre de la résolution de problèmes de conception reste donc à approfondir.

Compte tenu des effets induits par la prévalence de certaines contraintes dans les activités de conception, la pondération affectée aux contraintes (et/ou aux critères) doit être prise en compte lorsque l'on élabore un système d'aide à la conception. Un exemple particulièrement intéressant en est fourni par le système de Boissier & Al-Hajjar (1990). Ce système prend en considération à la fois les modifications de pondération des critères et la variabilité inter-individuelle à laquelle elle est soumise. La méthode de sélection "multicritère" de solutions utilisée tient compte des préférences de l'utilisateur puisqu'elle s'appuie sur des opérations d'agrégation censées traduire ses incertitudes (cf. paragraphe 2.2.3).

L'opération d'agrégation adéquate à l'utilisateur est identifiée à l'issue d'une interaction avec le système:

- trois objets sont présentés à l'utilisateur: le premier objet est incompatible avec un premier objectif et totalement compatible avec un second objectif, le second objet est moyennement compatible avec ces deux objectifs, le troisième objet est moyennement compatible avec le premier et totalement compatible avec le second;
- l'utilisateur doit, par une sélection dans un menu de réponses, exprimer son avis sur ces différents objets.

Les avis de l'utilisateur relatifs à ces solutions "types" sont interprétés pour déterminer le poids relatif des critères liés aux objectifs considérés et la possibilité ou non d'établir des compromis entre critères. L'opération d'agrégation la plus proche des réponses de l'utilisateur (qui correspond à la pondération obtenue pour les critères) est alors recherchée dans un catalogue donné.

SITUATION EXPERIMENTALE

L'expérience qui va être présentée a pour objectifs:

- d'appréhender le fonctionnement des processus d'évaluation et de sélection de solutions,
- d'identifier les critères auxquels les concepteurs se réfèrent,
- d'observer dans quelle mesure les processus d'évaluation et de sélection, et leurs référents (critères et contraintes), sont soumis à des effets du type de problème de conception, du niveau d'expertise des concepteurs (dans le domaine de chacun des problèmes de conception), et de leur type d'expertise (expertise liée à la fois à la formation des concepteurs et à leur tâche habituelle dans le bureau d'étude).

Afin d'atteindre ces différents objectifs, une étude de type expérimental a été réalisée dans le cadre de la résolution de problèmes de conception de produits aérospatiaux.

L'évaluation et la sélection de solutions ont été appréhendées dans une situation où les concepteurs sont confrontés à un problème auquel sont associées plusieurs solutions envisageables.

L'expérience proprement dite a été précédée d'une phase de constitution des problèmes et des solutions qui leur sont associées. Les problèmes et leurs solutions ont ensuite été présentés aux sujets.

1 CONSTITUTION DES PROBLEMES ET DE LEURS SOLUTIONS

L'effet du type de problème a été appréhendé en recourant à deux problèmes de conception se différenciant principalement par leur finalité (i.e. la conception des produits aérospatiaux nettement distincts), par leur degré de familiarité pour les concepteurs et par les solutions qui leur sont associées.

Une particularité du bureau d'étude où notre travail de terrain s'effectue est d'être divisé en deux grands domaines de conception. Aussi nous sommes-nous adressés à chacun des deux chefs de service affectés à ces domaines. L'objectif de l'étude leur a été exposé. Chacun d'eux a fourni un problème de son choix ainsi que plusieurs solutions alternatives. Les descriptions des problèmes et de leurs solutions ont été obtenues sous une forme écrite. Afin que ces descriptions soient explicites pour les futurs sujets de l'expérience, une précision était fournie aux chefs de service: les définitions de problème-solutions seraient présentées "telles quelles" aux futurs sujets i.e. sans que l'expérimentateur ne leur fournisse d'explications complémentaires.

Ces problèmes consistent tous les deux à concevoir une structure aérospatiale mais ils se différencient par plusieurs aspects:

- Ils relèvent de deux domaines d'application différents:

- + le premier problème concerne les A.C.U. (Adaptateur Charge Utile) i.e. des structures destinées à être intégrées dans la fusée Ariane 4;
- + le second concerne les réflecteurs i.e. des structures destinées à réfléchir l'énergie solaire pour alimenter des satellites.

- Le premier problème est traditionnel dans le bureau d'étude: il s'agit de la conception d'A.C.U. i.e. de produits développés depuis une douzaine d'années. Le second problème est nouveau: il correspond à un appel d'offre et consiste à concevoir un type particulier de réflecteurs (un réflecteur "reconfigurable" - ou Rf.R. - i.e. dont le profil doit être modifiable en orbite pour obtenir d'autres profils pré-sélectionnés).

- Le premier problème est présenté avec des attributs descriptifs non instantiés (i.e. sans que les valeurs précises de ses spécifications soient mentionnées). Par exemple, la masse maximale est présentée comme une exigence à prendre en considération pour concevoir l'A.C.U., sans que sa valeur soit fournie. La définition du second problème spécifie par contre certaines valeurs. Par exemple, le nombre maximal de points d'action pour déformer la surface doit être de 40.

- Les deux problèmes sont associés à des solutions, fournies elles aussi par les chefs de service, qui se différencient - outre leur nature - par leur nombre et par leur type:

- + Le premier problème est présenté avec un plus grand nombre de solutions que le second (24 solutions pour le problème traditionnel et 6 solutions pour le problème nouveau);
- + Les solutions du premier problème se situent à un niveau physique (i.e. réfèrent à des caractéristiques techniques) alors que celles du second problème sont conceptuelles (i.e. réfèrent à des "concepts" ou idées relatives l'élaboration de solutions schématiques).

Ces deux particularités seront approfondies et discutées dans le paragraphe 3 ("Validité de la situation expérimentale").

2 PROCEDURE

2.1 Les sujets de l'expérience

Quatorze concepteurs ont participé à cette étude. Ils se différencient par leur type d'expertise et par leur niveau d'expertise dans le domaine de chacun des problèmes de conception considérés.

Le type d'expertise réfère à la fois à l'expertise acquise au cours de la formation des concepteurs (formation en tant qu'ingénieurs ou techniciens) et à l'expertise mise en œuvre

dans le bureau d'étude, compte tenu de la tâche qu'ils y effectuent. Les tâches assignées aux ingénieurs et celles assignées aux techniciens sont en effet nettement délimitées même si elles apparaissent complémentaires:

- calcul de tenue des solutions à différentes exigences pour les ingénieurs-calculateurs et, de plus, supervision de la conception pour les ingénieurs-chefs de service;
- dessin et réalisation de liasses de plans, pour les techniciens-dessinateurs.

Le niveau d'expertise dans le domaine de chacun des problèmes de conception réfère au domaine de spécialité des concepteurs. En effet, compte tenu des deux types de produits étudiés dans le bureau d'étude et de la répartition entre les concepteurs de l'étude de ces produits, les sujets de l'expérience peuvent être:

- expérimentés dans le domaine des ACU (et, dans ce cas, non expérimentés dans celui des réflecteurs),
- expérimentés dans le domaine des réflecteurs (et, dans ce cas, non expérimentés dans celui des ACU),
- non expérimentés i.e. débutants dans l'un ou l'autre de ces deux domaines (ce qui ne concerne que quatre concepteurs).

2.2 L'ordre de présentation des problèmes

Deux groupes de sujets ont été constitués afin de neutraliser l'ordre de présentation des problèmes :

- les sujets d'un groupe traitent en premier le problème "A.C.U.", puis le problème "réflecteur reconfigurable",
- l'ordre de présentation des problèmes est inversé pour les sujets de l'autre groupe.

Les groupes de sujets sont appariés i.e. deux sujets présentant des caractéristiques similaires (du point de vue de leur tâche habituelle et de leur domaine d'expertise) sont affectés à chacun des groupes (cf. figure 1).

Concepteurs	Groupe 1	Groupe 2	Effectif
Ing.exp.ACU	1	1	2
Techn.exp.ACU	1	1	2
Ing.exp.Rf.	2	2	4
Techn.exp.Rf.	1	1	2
Ing.—exp ACU- Rf.	1	1	2
Techn.—exp ACU-Rf.	1	1	2

Figure 1: Groupes de sujets appariés

L'ordre de présentation des solutions a pu être neutralisé pour le problème réflecteur reconfigurable car il admet un nombre limité de solutions, contrairement au problème A.C.U. (6 vs 24). Chaque solution du problème réflecteur reconfigurable est en effet présentée à chaque sujet de chaque groupe dans un ordre différent et suivie et/ou précédée d'une solution différente (cf. figure 2).

1	2	3	4	5	6
2	4	1	6	3	5
4	6	2	5	1	3
6	5	4	3	2	1
5	3	6	1	4	2
3	1	5	2	6	4

Figure 2: Neutralisation de l'ordre de présentation
des solutions du problème Rf.R.

Légende:

- chaque solution est représentée par un chiffre
- chaque ligne indique l'ordre de présentation des solutions pour un sujet de chaque groupe.

2.3 La passation de l'expérience

La passation de l'expérience est individuelle. La consigne, mentionnée à chaque sujet et pour chacun des deux couples problème-solutions, est énoncée en plusieurs étapes.

1. "Considérez ce problème et les diverses solutions qui lui sont associées. Évaluez et portez un jugement sur chacune de ces solutions, en indiquant les critères auxquels vous vous référez pour cette évaluation".

Lorsque la tâche spécifiée par cette consigne a été accomplie par le sujet, la seconde consigne est énoncée:

2. "Sélectionnez les solutions qui vous semblent les plus satisfaisantes en indiquant les aspects ou critères qu'elles satisfont ou ne satisfont pas".

Lorsque plusieurs solutions sont retenues, la consigne est complétée: "Désignez la solution qui vous paraît la plus satisfaisante parmi celles que vous venez de sélectionner".

3 - Les sujets doivent ensuite relever les critères auxquels ils se sont référés pour l'évaluation et la sélection. Ils en constituent une liste qui sert de support à une tâche d'appréciation de l'importance relative des critères. La consigne en est la suivante:

"Hiérarchisez et pondérez ces critères en fonction de l'importance que vous leur attribuez, et affectez-leur une note sur 10".

Une telle échelle de notation a été adoptée spontanément par le premier chef de service consulté. Par souci d'homogénéité, elle a été conservée et proposée aux sujets suivants.

Cette tâche d'appréciation est intéressante car elle suscite des commentaires centrés sur les critères; ce qui permettra d'appréhender des relations entre critères³.

Les ingénieurs-chefs de service ont été consultés en premier (puisqu'ils ont chacun fourni un problème et ses solutions associées). Ils ont évalué les solutions qu'ils ont eux-même définies puis sélectionné l'une d'entre elles - conformément à la consigne ci-dessus. Chaque chef de service a, de plus, passé l'expérience en étant confronté au problème et aux solutions proposés par l'autre chef de service.

La majeure partie des sujets est constituée de concepteurs expérimentés dans le domaine de l'un des deux problèmes; aussi passent-ils l'expérience avec un problème relevant de leur domaine d'expertise et un problème d'un autre domaine. Les autres sujets passent forcément l'expérience avec deux problèmes de conception différents de ceux sur lesquels ils travaillent habituellement.

La passation de l'expérience dure de 1 heure 30 à 2 heures selon les sujets.

Les productions écrites sont recueillies et les commentaires sont enregistrés et retranscrits.

3 VALIDITE DE LA SITUATION EXPERIMENTALE

La situation expérimentale mise en place présente certaines particularités. Nous allons en apprécier la validité en fonction de deux points de vue:

- ces caractéristiques rendent-elles compte d'une situation réelle ?
- permettent-elles d'atteindre les objectifs de l'étude, à savoir: étudier les processus d'évaluation et de sélection de solutions variées, et identifier les critères utilisés par les concepteurs ?

1. La définition du problème traditionnel est constituée d'une suite d'exigences non instantiées alors que les valeurs précises sont spécifiées pour le problème nouveau (cf. annexes 1-a et 2-a).

Dans une situation réelle, les spécifications du cahier des charges sont accompagnées de valeurs précises. La définition du problème traditionnel ne rend donc pas compte de cette

³ La hiérarchisation et la pondération des critères ne sont pas analysées dans ce rapport.

caractéristique, contrairement à la définition du problème nouveau. Cependant la transmission orale (par le chef de service, par exemple) des spécifications du problème peut ne porter que sur les tendances à respecter pour la conception sans que les valeurs précises soient mentionnées. La définition du problème traditionnel correspondrait à ce second cas.

Il est à noter que les chefs de service ont fourni les définitions des problème en choisissant eux-mêmes le mode de description. L'absence d'instantiation (volontaire de la part du chef de service) lorsque le problème est traditionnel dans le bureau d'étude, permet de supposer que les concepteurs disposent d'un schéma (de problème ou de solution⁴) déjà instantié lui correspondant. Dans le cas d'un problème nouveau, les concepteurs ne disposeraient pas d'un tel schéma. Pour cette raison, la définition du problème comporte des valeurs précises, que les concepteurs peuvent interpréter afin de déterminer les orientations de conception importantes à respecter.

2. Chaque sujet est confronté à un ensemble de solutions envisageables, qu'il doit évaluer dans le but de sélectionner une solution satisfaisante.

Cette situation est apparemment éloignée d'une situation réelle de résolution individuelle d'un problème de conception. En effet, un concepteur évoque généralement une seule solution, susceptible de résoudre le problème (ou le sous-problème) considéré; il l'évalue et ne recherche une solution alternative que si la première évoquée se révèle insatisfaisante.

Cependant, lorsque le concepteur ne dispose pas de toutes les informations nécessaires pour décider si cette solution est satisfaisante, il envisage plusieurs solutions susceptibles de se conformer à plusieurs cas de figure. Il peut alors s'engager dans une activité d'évaluation comparative des solutions alternatives, qui présente des similitudes avec la tâche expérimentale proposée dans cette étude.

Plusieurs solutions peuvent aussi être envisagées simultanément lorsque les concepteurs sont engagés dans la résolution collective d'un problème de conception (où des solutions différentes sont suggérées par des concepteurs différents).

Cependant, que la résolution soit individuelle ou collective, la quantité de solutions envisagée dans les situations naturelles reste relativement réduite et n'atteint, bien sûr, jamais celle du problème traditionnel (24 solutions). Nous verrons cependant, lors de l'analyse des solutions sélectionnées pour ce problème, que certaines solutions appartiennent à une même famille de solutions et ne constituent que des variantes d'un nombre limité de types de solutions. Ainsi la quantité de solutions réellement différentes serait nettement inférieure au nombre de solutions présentées. La quantité de solutions du problème nouveau (6 solutions) est plausible dans une tâche de résolution collective; ces solutions ont, de plus, été réellement envisagées pour répondre à l'appel d'offre motivant la résolution de ce problème de conception.

⁴ La distinction entre schéma de problème et schéma de solution ne semble pas pertinente car l'une des caractéristiques des tâches de conception est que le problème et "sa" solution ne sont pas dissociés: la représentation du problème se précise au fur et à mesure des choix relatifs à "sa" solution; la définition progressive de la solution amène à définir le problème.

Quoi qu'il en soit, la tâche expérimentale présente l'intérêt d'amener les sujets à évaluer des solutions variées et ainsi à évoquer un ensemble potentiellement vaste de critères. De plus, elle permet d'appréhender la démarche de sélection d'une solution dans deux contextes nettement distincts.

3. Les solutions envisagées pour chacun des problèmes se distinguent par leur nombre et leur niveau de représentation (cf annexes 1-b et 2-b).

Le nombre de solutions

- Les solutions du problème traditionnel sont au nombre de 24.

Elles ont été déterminées par le chef de service en combinant différentes valeurs envisageables pour les attributs d'une solution. Par exemple, l'attribut "matériau" admet la valeur "métal" ou la valeur "carbone". Un autre attribut "concepts structuraux" admet les valeurs "monolithique", "monolithique raidi" et "sandwich". La combinaison de toutes les valeurs définit un grand nombre de solutions. Cet ensemble de solutions a été réduit par le chef de service en appliquant plusieurs principes:

- éliminer les solutions non valides,
- regrouper les solutions similaires (ex: les liaisons par boulons et les liaisons par rivets),
- conserver les solutions les plus représentatives.

Malgré ces regroupements et la sélection de solutions représentatives, des solutions ne se différenciant que par la valeur d'un seul attribut (éventuellement d'importance mineure) ont été conservées en tant que solutions distinctes.

- Les solutions du problème nouveau sont au nombre de 6.

Trois solutions sont dérivées d'une solution déjà utilisée dans le domaine des réflecteurs; les autres ont été envisagées par le chef de service (éventuellement en collaboration avec d'autres concepteurs expérimentés dans le domaine) sans qu'elles aient antérieurement été développées.

Le niveau de représentation

- Les solutions du premier problème se situent à un niveau physique: elles concernent des choix techniques tels que le choix du matériau ou du concept structural.
- Les solutions du second problème se situent à un niveau conceptuel: elles concernent l'élaboration de solutions schématiques, comme par exemple, la décomposition de la structure en facettes.

Exemple de solution à un niveau physique:

- matériau de la coque: métal
- concept structural: monolithique
- cadres: métallique
- liaison: boulons ou rivets

Exemple de solution à un niveau conceptuel:

- concept: réflecteur à tricot tendu sur une structure porteuse non déformable
- méthode (d'obtention de la précision du profil): décomposition de la surface en "facettes"
- principe (de modification du profil): fils indépendants pouvant glisser entre eux reliés à la structure porteuse par des éléments élastiques

Légende:

caractères soulignés: attributs descriptifs de la solution

caractères standards: valeurs instantiant les attributs

Ces deux niveaux de solutions peuvent s'observer en situation réelle:

- ils correspondent à deux types de situations: à une situation de conception "répétitive" (où il s'agit de rechercher des solutions situées à un niveau physique) et à une situation de conception "innovatrice" (où il s'agit de rechercher des solutions conceptuelles);
- ils correspondent de plus à deux étapes de l'activité de conception: le concepteur élabore tout d'abord une solution conceptuelle (compte tenu de l'"idée" qu'il se constitue du produit à concevoir), qu'il va progressivement préciser en adoptant des points de vue de plus en plus concrets (changements de représentation de la solution) jusqu'à parvenir à la définition des caractéristiques physiques (ou techniques) de la solution.

Etudier le raisonnement des concepteurs dans ces deux types de situation semble donc particulièrement intéressant.

RESULTATS

Les données recueillies au cours de l'expérience ont été analysées en fonction de trois finalités:

- étudier les stratégies d'évaluation et de sélection de solutions,
- comparer les solutions retenues par les différents sujets,
- appréhender les critères auxquels les concepteurs se réfèrent.

Plusieurs facteurs sont susceptibles d'intervenir, et sont, de plus, intéressants à étudier dans le but d'améliorer ou de développer des systèmes d'aide à la conception:

- le type de problème présenté (problème de conception traditionnel ou nouveau dans le bureau d'étude),
- le niveau d'expertise des concepteurs dans le domaine de l'un ou l'autre des problèmes de conception,
- le type d'expertise des concepteurs, qui réfère à l'expertise liée à la fois à la formation des concepteurs (spécificités de la formation des ingénieurs et de celle des techniciens) et à la tâche qu'ils effectuent habituellement dans le bureau d'étude (tâche de calcul pour les ingénieurs et tâche de dessin pour les techniciens).

1 L'EVALUATION DE SOLUTIONS

D'une façon générale, les concepteurs ont commencé par analyser et évaluer oralement les solutions puis ils ont noté par écrit les résultats de leur réflexion. Ces notes écrites et les commentaires des concepteurs ont été analysés en considérant différentes observables:

- l'ordre de traitement des solutions,
- les stratégies d'évaluation des solutions,
- les similitudes exprimées entre certaines solutions (et les regroupements de solutions qu'elles permettent de constituer).

L'appréhension globale de ces résultats permet de constater que l'ordre de présentation des problèmes (i.e. ACU puis Rf.R ou Rf.R puis ACU) n'induit pas de différence dans le traitement des problèmes et des solutions. Les effets des facteurs "type de problème", "type d'expertise" et "niveau d'expertise dans le domaine" ont par contre été approfondis.

Les résultats concernant le problème traditionnel ("A.C.U") seront présentés en premier, puis suivis de ceux obtenus avec le problème nouveau ("réflecteur reconfigurable"), cela pour chacune des observables considérées.

1.1 Type de Problème et Ordre de Traitement des Solutions

Le type de problème traité (et ses solutions) a un effet marqué sur l'ordre de traitement des solutions.

Bien que le traitement des solutions soit en général conforme à leur ordre de lecture, on assiste:

- Dans le cas du problème traditionnel, à des "retours" sur des solutions déjà traitées. Cela se produit lorsque les concepteurs évoquent un critère qui n'a pas encore été utilisé pour traiter les solutions et qu'ils complètent l'évaluation des solutions précédentes en focalisant leur attention sur ce critère supplémentaire. Il s'agit ici d'un indice de l'activité de contrôle mise en œuvre par les concepteurs au cours de l'évaluation des solutions: ils disposeraient de connaissances relatives aux critères que doit satisfaire "la" solution du problème traditionnel, et le constat d'une évaluation non exhaustive susciterait le "retour" sur les solutions antérieures.
- Dans le cas du problème nouveau, les solutions étant nouvelles, les concepteurs peuvent éprouver des difficultés pour les comprendre, en particulier les concepteurs non expérimentés dans le domaine des réflecteurs. La stratégie qu'ils mettent alors en œuvre consiste à traiter les solutions "de la plus facile vers les plus difficiles".

1.2 Les Stratégies d'Evaluation de Solutions

1.2.1 Les stratégies d'évaluation pour le problème traditionnel

La plupart des concepteurs (13 sur 14) analysent et évaluent les solutions puis en sélectionnent certaines. On n'observe donc pas d'effet du type d'expertise, ni du niveau d'expertise dans le domaine sur la réussite globale de la tâche expérimentale. Cela s'explique évidemment par le fait qu'il s'agit d'un type de problème connu de tous les concepteurs, y compris de ceux qui n'ont jamais travaillé sur les A.C.U.

Le problème traditionnel admettant 24 solutions et la mémoire de travail étant limitée, toutes les solutions ne peuvent être traitées en même temps. Les concepteurs ont donc adopté des stratégies d'évaluation parmi lesquelles plusieurs types ont été identifiés:

1ère stratégie: lire et évaluer immédiatement chaque solution une à une;

2ème stratégie: il s'agit d'une variante de la première puisqu'elle consiste à lire et à évaluer chaque solution une à une tout en explicitant les similitudes avec la (les) solutions précédentes;

3ème stratégie: lire d'abord toutes les solutions puis les catégoriser (i.e. les regrouper par familles) puis évaluer chaque catégorie obtenue;

4ème stratégie: lire d'abord toutes les solutions puis évaluer les valeurs alternatives des attributs descriptifs des solutions. Lorsque cette stratégie est adoptée, les sujets commencent par évaluer, pour toutes les solutions, les valeurs des attributs qu'ils jugent les plus importants et par spécifier les valeurs qu'ils préfèrent. Ils procèdent ensuite de même avec les attributs considérés comme moins importants.

Après avoir caractérisé les diverses stratégies d'évaluation, nous allons rechercher si elles sont propres à certains concepteurs.

Une première constatation est que la stratégie d'évaluation 1 est utilisée par une grande partie des concepteurs (9 sur 14) mais uniquement pour traiter les premières solutions (de deux à dix solutions; cf. annexe 3). Les concepteurs modifient cette stratégie ou en changent complètement pour adopter la stratégie 2 ou la stratégie 3. La stratégie 4 peut par contre être adoptée tout au long de la tâche d'évaluation.

La mise en évidence de ces stratégies donne lieu à plusieurs remarques:

- L'utilisation de la stratégie 1 uniquement en début de réalisation de la tâche d'évaluation montre l'existence d'une phase d'adaptation à la tâche expérimentale. Aussi, les effets du type de tâche et du niveau d'expertise dans le domaine vont-ils être recherchés après la période d'adaptation i.e. après le(s) changement(s) de stratégies.
- Les stratégies 1 et 2 incluent toutes les deux un traitement des solutions une à une; aussi sont-elles regroupées; il en est de même des stratégies 3 et 4 qui correspondent à un traitement des solutions dans leur ensemble. Cette simplification de traitement des résultats permettra d'appréhender plus clairement d'éventuels effets du type et du niveau d'expertise des concepteurs.

Deux tendances apparaissent:

1. Le type d'expertise influence le traitement des solutions: tous les ingénieurs traitent les solutions dans leur ensemble (cf. tableau 1). Les techniciens utilisent les deux types de stratégies: la moitié d'entre eux traite les solutions une à une, l'autre moitié les traite dans leur ensemble.
2. Le niveau d'expertise dans le domaine du problème traditionnel semble lui aussi influencer le traitement des solutions: les concepteurs non expérimentés ont tendance à traiter les solutions dans leur ensemble (cf. tableau 2). Les concepteurs expérimentés utilisent quant à eux les deux types de stratégies.

Type d'expertise	Ing.Calculateur	Techn.Dessinateur
Type de stratégie		
1 - 2	0	3
3 - 4	7	3

Tableau 1: L'effet du type d'expertise des concepteurs sur les stratégies mises en œuvre après un délai d'adaptation

Niveau d'expertise	Exp. pb. trad.	Non exp.pb.trad.
Type de stratégie		
1 - 2	2	1
3 - 4	3	7

Tableau 2: L'effet du niveau d'expertise dans le domaine sur les stratégies mises en œuvre après un délai d'adaptation

Note: L'un des concepteurs n'a évalué que quelques solutions parmi celles présentées, ce qui ne permet pas d'identifier sa stratégie de traitement (d'où un effectif de 13 au lieu de 14 dans les tableaux suivants).

1.2.2 Les stratégies d'évaluation pour le problème nouveau

Contrairement à ce qui a été observé lors du traitement du problème traditionnel, la réussite globale de la tâche expérimentale réalisée avec le nouveau problème est soumise à un effet du niveau d'expertise dans le domaine, indépendant de l'ancienneté des concepteurs dans le bureau d'étude et de leur type d'expertise:

- Les concepteurs qui n'ont jamais travaillé dans le domaine du nouveau problème (tout en ayant des connaissances dans le domaine aérospatial) éprouvent des difficultés dans la compréhension du problème et de ses solutions. Cela se manifeste par un grand nombre de questions posées à l'expérimentateur et par de fréquentes redescriptions orales et écrites des solutions à la place (partiellement ou totalement) de l'évaluation demandée.
- Les concepteurs qui ont déjà travaillé dans le domaine de ce problème sont en mesure de comprendre les solutions présentées et ne posent donc que peu de questions. Ils commencent cependant par interpréter les solutions: ils les redéfinissent d'une façon plus opérationnelle, ils les analysent en simulant mentalement leur fonctionnement ou en s'appuyant sur des supports graphiques et/ou gestuels. Les concepteurs se constituent ainsi une représentation des solutions et c'est sur cette base qu'ils effectuent la tâche d'évaluation.

L'évaluation, conduite essentiellement par les concepteurs expérimentés dans le domaine, aboutit à l'identification des avantages et des inconvénients des solutions. Pour y parvenir les concepteurs peuvent :

- comparer les solutions proposées,
- rechercher des similitudes entre certaines solutions proposées et la solution "standard" déjà utilisée dans le domaine des réflecteurs; lorsque de tels liens de similitudes sont établis, ils sont considérés comme des avantages de la solution proposée.

Exemple: "La solution 4 est moins risquée que la 6 car elle est plus proche des solutions 1, 2, 3" (solutions considérées comme présentant des similitudes avec la solution standard déjà connue)

1.2.3 Discussion

- Le niveau d'expertise dans le domaine du problème a influencé la réussite globale de la tâche expérimentale pour le problème nouveau mais pas pour le problème traditionnel. Les concepteurs disposent de connaissances techniques relatives aux produits aérospatiaux conçus dans le bureau d'étude, ce qui leur permet de se représenter (plus ou moins précisément selon leur domaine d'expertise) les solutions déjà mises en œuvre dans l'entreprise. Le problème traditionnel entre dans ce cadre: un concept "standard" a déjà été adopté ("concevoir une structure conique"), et les solutions proposées se différencient uniquement par des différences techniques. Les concepteurs sont donc en mesure d'évaluer ces solutions (ne serait-ce que par comparaison avec la solution "standard"). Le problème nouveau entre dans un cadre différent: les solutions proposées ne présentent que peu de similitudes avec des solutions connues et leurs différences sont de nature conceptuelle. Il est donc difficile pour des concepteurs non expérimentés dans le domaine du problème nouveau d'apprécier (ou, fait constaté, de comprendre) ces solutions.
- Une influence du type d'expertise des concepteurs a été observée dans le cas du problème traditionnel. Le traitement mis en œuvre par les ingénieurs porte systématiquement sur des types de solutions (et non sur des solutions individuelles). Il se peut que les connaissances des ingénieurs soient davantage structurées en fonction de classes ou types de solutions alors que les connaissances des techniciens seraient davantage structurées en fonction de "cas" ou problèmes particuliers. Cette différence de structuration pourrait quant à elle s'expliquer par la formation différenciée qu'ont reçue les ingénieurs et les techniciens et/ou par la nature de leur tâche dans le bureau d'étude (calcul pour les ingénieurs, en se conformant à des règles spécifiques selon la classe de problèmes traités; dessin pour les techniciens, en tenant compte des spécificités - dimensionnelles par exemple - de chaque problème de conception).
- Un effet du niveau d'expertise a été observé dans le traitement du problème traditionnel: les concepteurs non expérimentés parcourent toutes les solutions avant d'évaluer leurs caractéristiques. Bien que la manifestation soit la même que celle décrite précédemment pour les ingénieurs, les interprétations possibles nous semblent de nature différente:
 - les concepteurs non expérimentés dans le domaine du problème peuvent hésiter à s'engager dans une tâche qu'ils ne maîtrisent pas totalement;
 - il peut leur être nécessaire d'affiner leur représentation des solutions, par exemple en les comparant les unes aux autres.

Les concepteurs expérimentés dans le domaine disposent par contre déjà de représentations précises des solutions, ce qui leur permet d'évaluer directement les solutions (i.e. les unes à la suite des autres). Ce traitement des solutions une à une peut être rapproché de la stratégie dite "en profondeur d'abord": elles consistent toutes deux en un approfondissement de chaque élément (ou solution) avant de passer au suivant. On constate ainsi une adéquation entre la stratégie d'évaluation développée par certains concepteurs et celle mise en œuvre dans les

systèmes experts critiques, ce qui tend à conférer à ces derniers une certaine validité psychologique.

1.3 L'EXPRESSION DE SIMILITUDES ENTRE SOLUTIONS

De nombreux concepteurs expriment spontanément des liens de similitudes entre certaines solutions, ce qui permet à certains d'entre eux de regrouper et de catégoriser les solutions. De tels regroupements peuvent s'expliquer par le nombre important de solutions à traiter, notamment dans le cas du problème traditionnel (24 solutions): l'identification de similitudes et la constitution de groupes de solutions peut alléger la charge mnésique des concepteurs. Davantage de concepteurs ont exprimé des liens de similitudes entre les solutions du problème traditionnel qu'entre celles du problème nouveau, ce qui corrobore l'hypothèse d'une influence du facteur "nombre de solutions". Cependant d'autres facteurs étant susceptibles d'intervenir, les déterminants de l'identification de similitudes entre solutions vont être recherchés.

1.3.1 L'identification de similitudes entre solutions

1.3.1.1 L'identification de similitudes pour le problème traditionnel

La majorité des concepteurs identifient des liens de similitudes entre certaines solutions du problème traditionnel (12 concepteurs sur 14); cela soit au cours de l'évaluation des solutions (10 sujets), soit après l'évaluation (2 sujets). Deux concepteurs seulement n'ont pas effectué un tel traitement: il s'agit de deux ingénieurs non expérimentés dans le domaine (l'un n'a traité que quelques-unes des solutions présentées; l'autre n'a considéré que certains attributs des solutions - stratégie 4).

Les similitudes exprimées par la plupart des concepteurs ont permis d'identifier trois groupes de solutions: solutions de 1 à 9, de 10 à 17 et celles de 18 à 24 (dont les caractéristiques sont approfondies dans le paragraphe 1.3.2). L'identification de similitudes entre ces solutions ne semble dépendre ni du type d'expertise, ni du niveau d'expertise dans le domaine (cf. tableau II de l'annexe 7).

L'identification de similitudes résulte de la mise en œuvre de trois procédures différentes, identifiées lors de l'analyse des stratégies d'évaluation:

- remarquer et spécifier les similitudes entre les solutions au fur et à mesure de leur lecture et de leur évaluation (stratégie 2);
- remarquer les similitudes entre solutions au cours de la lecture, puis regrouper et catégoriser les solutions en fonction de leurs caractéristiques communes (stratégie 3);

- remarquer les similitudes entre solutions au cours de la lecture, et après avoir évalué les attributs des solutions, regrouper ces solutions (stratégie 4).

Ces procédures d'identification de similitudes peuvent être mises en œuvre à des "moments" différents (cf. tableau 3):

- les stratégies 2 et 3 permettent d'identifier des similitudes au cours de l'évaluation des solutions,
- la stratégie 4 permet d'identifier des similitudes à l'issue de l'évaluation des solutions.

Spécification des similitudes	au cours de l'évaluation	après l'évaluation
Stratégies d'évaluation		
Stratégie 2	3	0
Stratégie 3	7	0
Stratégie 4	0	2

Tableau 3: Stratégies d'évaluation et moment d'expression des similitudes entre solutions

1.3 1.2 L'identification de similitudes pour le problème nouveau

La majorité des concepteurs identifient aussi des liens de similitudes entre certaines solutions du problème nouveau (8 concepteurs sur 14); cela systématiquement au cours de l'évaluation. Les similitudes exprimées par les concepteurs permettent d'identifier un seul groupe de solutions: les concepteurs regroupent les solutions 1, 2 et 3 mais considèrent individuellement les autres solutions.

Le niveau d'expertise dans le domaine ne semble pas influencer sur l'identification de similitudes entre solutions. Par contre, le type d'expertise semble exercer une influence: la plupart des ingénieurs spécifient des similitudes entre certaines solutions vs un seul dessinateur (i.e. 7 ingénieurs sur 8, 1 dessinateur sur 6; cf. tableau 4). Cette tendance peut, de nouveau, résulter de la formation des ingénieurs et/ou de la nature de leur tâche dans le bureau d'étude (cf. paragraphe 1.2.3).

Type d'expertise	Ingénieur-Calculateur		Technicien-Dessinateur	
Niveau d'expertise	Exp pb nouveau	Non exp pb nouveau	Exp pb nouveau	Non exp pb nouveau
Expression de similitudes				
Oui	3	4	1	0
Non	1	0	1	4

Tableau 4: L'influence du type d'expertise des concepteurs et de leur niveau d'expertise dans le domaine sur l'expression de similitudes entre les solutions du problème nouveau

Un résultat inattendu est que la solution 5 est considérée par certains concepteurs comme ne constituant pas une solution à part entière (cf. tableau III de l'annexe 7). Contrairement aux autres solutions, celle-ci ne se situe pas à un niveau conceptuel mais à un niveau physique (elle spécifie des caractéristiques techniques). Certains concepteurs semblent donc sensibles à un effet de contexte: une solution physique intégrée dans un ensemble de solutions conceptuelles est perçue comme différente et comme ne constituant pas une solution à part entière.

1.3.2 Les dimensions sous-jacentes aux similitudes

Le fait que les concepteurs expriment des liens de similitudes entre les mêmes solutions et que certains concepteurs les regroupent ne signifie pas nécessairement qu'ils considèrent les mêmes dimensions des solutions; ces dimensions sous-jacentes aux similitudes exprimées vont donc être analysées.

1.3.2.1 Les dimensions sous-jacentes aux similitudes pour le problème traditionnel

Deux types de dimensions, sous-jacentes aux similitudes exprimées et aux regroupements qui leur sont consécutifs, ont été identifiés:

a) Les "attributs descriptifs" des solutions

- Certains concepteurs regroupent les solutions ayant la même valeur sur un même attribut (l'attribut "matériau de la coque" apparaît ainsi prépondérant).
- D'autres concepteurs se réfèrent à deux attributs à la fois (l'attribut "matériau de la coque" combiné avec l'attribut "concept structural").

Ces attributs sont ceux que le chef de service a employés pour décrire les solutions. Certains concepteurs se réfèrent donc aux "attributs descriptifs" des solutions.

b) Les critères d'évaluation des solutions

Les concepteurs regroupent les solutions donnant lieu à une même appréciation sur un critère d'évaluation (tel que l'"expérience acquise" ou la "masse"). Le regroupement de solutions repose donc sur la satisfaction (ou non) de certains critères.

Compte-tenu de différents résultats relatifs aux différences entre sujets expérimentés dans un domaine et sujets non expérimentés (cf. Chi, Feltovich & Glaser, 1981; Bonnardel, 1990), l'hypothèse suivante peut être émise: les attributs descriptifs des solutions peuvent sous-tendre les similitudes exprimées par les concepteurs non expérimentés dans le domaine alors que les concepteurs expérimentés s'appuieraient sur des considérations de nature évaluative. L'influence du niveau d'expertise dans le domaine et celle des stratégies d'évaluation (intervenant dans l'expression de similitudes) sur les dimensions prises en considération par les concepteurs vont être recherchées. Les réflexions évaluatives dépendant des attributs descriptifs des solutions, seules les dimensions citées d'emblée par les concepteurs vont être considérées.

1. Le niveau d'expertise dans le domaine

Les traitements reposant sur des critères d'évaluation sont opposés à ceux qui s'appuient sur des attributs descriptifs (cf. tableau 5).

Un effet du niveau d'expertise dans le domaine du problème est observé: tous les concepteurs expérimentés traitent les solutions en se référant à des critères d'évaluation, cela indépendamment de leur type d'expertise. Les concepteurs non expérimentés se réfèrent par contre aux deux types de dimensions sous-jacentes aux similitudes. L'hypothèse émise précédemment est donc en partie vérifiée.

Niveau d'expertise Type d'expertise	Expérimenté ACU		Non expérimenté ACU	
	Ing.- Calc.	Tech.- Dess.	Ing.- Calc.	Tech.- Dess.
Dimensions sous-jacentes				
Critères d'évaluation	2	3	2	1
Attributs descriptifs	0	0	2	2

Tableau 5: L'effet du type d'expertise des concepteurs et de leur niveau d'expertise dans le domaine sur les dimensions sous-jacentes aux similitudes exprimées à propos des solutions du problème traditionnel.

Cette observation peut être rapprochée de certains résultats de Chi, Feltovich & Glaser (1981) puisqu'elle les corrobore en partie:

- ces auteurs ont montré que les experts en physique se réfèrent aux principes physiques sous-jacents aux problèmes (par exemple, la loi de conservation de l'énergie) alors que les

novices se réfèrent à la structure de surface des problèmes (par exemple, la présence de blocs sur des plans inclinés);

- la structure de surface des problèmes de physique peut être rapprochée des attributs descriptifs des solutions; les principes physiques sous-jacents aux problèmes nous semblent, compte-tenu de la réflexion qu'ils nécessitent (vs l'accès immédiat aux caractéristiques de surface des solutions), pouvoir être rapprochés des critères d'évaluation.

2. Les stratégies d'évaluation de solutions

Stratégies d'évaluation	Stratégie 2	Stratégie 3	Stratégie 4
Dimensions sous-jacentes			
Critères d'évaluation	3	5	0
Attributs descriptifs	0	2	2

Tableau 6: L'effectif de concepteurs mettant en œuvre les stratégies de traitement des solutions et les dimensions sous-jacentes aux similitudes qu'ils expriment.

Certaines stratégies semblent influencer sur les dimensions sous-jacentes aux similitudes exprimées: la stratégie 2 débouche uniquement sur la prise en compte de critères d'évaluation, la stratégie 4 aboutit uniquement à la prise en compte d'attributs descriptifs. La stratégie 3 aboutit par contre aux deux types de catégorisation, selon le niveau d'expertise des concepteurs qui l'utilisent.

Cette influence des stratégies s'associe à l'influence de certaines caractéristiques des concepteurs puisque la stratégie 2 est uniquement mise en œuvre par des dessinateurs et la stratégie 4 uniquement par des concepteurs non expérimentés.

Les stratégies d'évaluation de solutions et l'expression de similitudes entre elles apparaissent ainsi liées.

1.3.2.2 Les dimensions sous-jacentes aux similitudes pour le problème nouveau

Les similitudes exprimées reposent fréquemment sur l'attribut descriptif "présence d'un tricot" (pour 7 sujets sur 8, cf. tableau III de l'annexe 5). Un seul concepteur (un ingénieur non expérimenté dans le domaine du problème nouveau) se réfère à un attribut différent ("présence ou non de fils"), mais les solutions qu'il considère comme similaires restent les mêmes.

L'attribut "présence d'un tricot" caractérise la solution habituellement développée dans le domaine des réflecteurs. Les concepteurs cherchent donc à identifier les similitudes existant

entre les solutions présentées en recherchant des caractéristiques déjà connues, qui leur servent de focus de l'attention.

L'identification de similitudes entre les solutions du problème nouveau s'effectue ainsi en fonction d'un attribut descriptif et non en fonction de critères d'évaluation. Cependant, le fait que cet attribut descriptif caractérise la solution "standard" dans le domaine traduit la prévalence du critère "expérience industrielle".

1.3.3 Le traitement des solutions

Trois types de traitement de solutions ont été mis en œuvre selon le contexte de résolution, le type d'expertise des concepteurs et leur niveau d'expertise dans le domaine du problème considéré cf. (tableau 7):

1. Traitement ponctuel des solutions

Ce type de traitement est mis en œuvre par les dessinateurs lorsqu'ils sont confrontés à des solutions conceptuelles: les solutions sont traitées indépendamment les unes des autres.

2. Traitement en fonction d'attributs descriptifs

Ce type de traitement s'observe lorsque les ingénieurs sont confrontés aux solutions conceptuelles et lorsque les concepteurs non expérimentés dans le domaine sont confrontés à des solutions situées à un niveau physique.

3. Traitement en fonction de critères d'évaluation

Les concepteurs expérimentés dans le domaine se réfèrent directement à des critères d'évaluation pour porter un jugement sur les solutions et/ou pour les regrouper. Ce résultat confirme la particularité et l'importance des processus évaluatifs chez les concepteurs experts.

Type de problème	Problème traditionnel	Problème nouveau
Effectif de concepteurs exprimant des similitudes Facteurs exerçant un effet Dimensions prises en considération	12 Niveau d'expertise Expérimentés: critères d'évaluation Non exp.: attributs descriptifs ou critères d'évaluation	8 Type d'expertise Ingénieurs: attributs descriptifs Techniciens: solutions individuelles, sans expression de similitudes

Tableau 7: Comparaison des principaux résultats obtenus avec le problème traditionnel et avec le problème nouveau

1.4 Eléments de Modélisation

Les différentes étapes de la réalisation de la tâche (évaluation et sélection de solutions) vont tout d'abord être évoquées. Certains aspects importants, relevés au cours de l'activité d'évaluation mise en œuvre par les concepteurs expérimentés dans le domaine (développant l'activité la plus vaste), seront ensuite présentés.

1.4.1 Les étapes de la réalisation de la tâche

La tâche expérimentale semble réalisée en plusieurs étapes itératives (schématisées sur la figure 3 ci-dessous).

- L'évaluation des solutions aboutit à leur redescription en termes de satisfaction (ou non) de contraintes et de critères. Les contraintes et les critères permettent ainsi de caractériser les solutions d'un point de vue évaluatif. Aussi le terme "attributs évaluatifs" va-t-il être utilisé pour référer à la fois aux contraintes et aux critères.

Lorsque toutes les solutions ont été traitées, les concepteurs vérifient l'exhaustivité des attributs évaluatifs considérés (y compris les contraintes prescrites, ce qui permet aux concepteurs de s'assurer que toutes les spécifications ont été prises en compte).

- La sélection de solutions s'effectue ensuite. Elle consiste tout d'abord à éliminer:
 - soit les solutions jugées non valides (ce qui est le cas d'une solution du problème nouveau) en se référant à des critères "destructifs" (terminologie des concepteurs),
 - soit les solutions inhabituelles dans le bureau d'étude, ce qui montre la prépondérance du critère "expérience industrielle".
- La sélection se poursuit par une recherche des solutions les plus satisfaisantes, en se référant à des critères de "choix" ou de "sélection" (termes des concepteurs). Cette différenciation dans la fonctionnalité des critères (critères destructifs vs de choix ou de sélection) corrobore la distinction entre les contraintes de validité et les contraintes de préférence (Janssen et al., 1989).

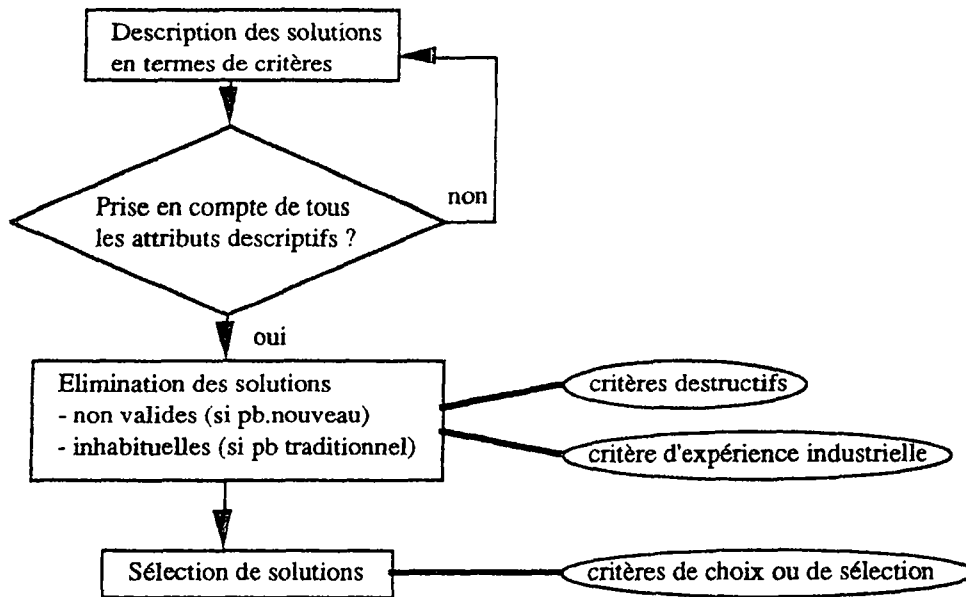


Figure 3: Schématisation de la démarche des concepteurs

1.4.2 Les caractéristiques de l'évaluation de solutions

L'activité évaluatrice des concepteurs expérimentés a donné lieu à une modélisation qui paraît relativement générale puisque les processus identifiés s'observent, d'une part chez les ingénieurs et chez les dessinateurs, et d'autre part lors du traitement des deux problèmes (cf. annexe 4). Les aspects les plus importants sont rapportés ici conformément à leur ordre d'intervention dans la démarche des concepteurs.

1. Evaluation consécutive à l'évocation d'une solution standard

La lecture de la solution proposée - et l'identification de ses caractéristiques - suscite l'évocation d'une solution standard. Une évaluation comparative des deux solutions a alors lieu. Elle consiste en une recherche des similitudes et des différences entre les deux solutions, dans le but d'identifier les avantages et les inconvénients de la solution proposée. Ce mode d'évaluation corrobore l'hypothèse selon laquelle les concepteurs disposeraient d'une représentation de la solution standard, qui leur servirait de référence pour évaluer les solutions proposées.

Un traitement particulier a été identifié lorsque les concepteurs expérimentés connaissent déjà la solution proposée et qu'elle a été élaborée pour améliorer une solution antérieure: ils exposent cette solution antérieure et l'évaluent en soulignant ses aspects négatifs; ces derniers leur permettent de justifier la génération de la solution proposée.

2. Relation entre critères et contraintes

La détermination des caractéristiques de la solution suscite:

- la recherche des implications de la solution (par une simulation mentale de son fonctionnement),
- l'activation d'un ou plusieurs critères,
- la génération d'une ou plusieurs contraintes correspondant à ces critères.

Exemple: "pour des questions de coût et de fiabilité, *il faut limiter le nombre d'éléments*"

(en caractères soulignés: les critères; en *italique* : la contrainte construite).

Une relation entre critères et contraintes est ainsi mise en évidence: la définition de contraintes "construites" provient de la traduction fonctionnelle d'un ou de plusieurs critères.

3. Evaluation des critères et contraintes

La pertinence des attributs évaluatifs générés (critères et contraintes) est évaluée en fonction du problème considéré:

- Un constat de "non pertinence" implique qu'ils ne seront pas pris en compte dans la suite du processus (même s'il s'agit de contraintes prescrites);
- Un constat de pertinence implique que la solution proposée va être évaluée en se référant à ces attributs évaluatifs.

4. Evaluation "négative" et résolution de sous-problèmes

Lorsque l'évaluation de la solution conclut à une incompatibilité avec certains critères ou certaines contraintes, les aspects "négatifs" de la solution sont considérés comme des sous-problèmes. On assiste alors à un fait inattendu: les concepteurs essaient de résoudre ces sous-problèmes en élaborant des "sous-solutions" (ce qui n'était pas demandé). Ainsi, dès qu'un concepteur expérimenté identifie les inconvénients d'une solution, sa réaction immédiate est de s'engager dans une démarche de résolution des sous-problèmes identifiés.

La recherche de sous-solutions est guidée par les contraintes à satisfaire et consécutive à une relation d'équivalence établie entre les contraintes de conception et des buts de conception (Zreik & Zeitoun, 1990).

5. Evaluation indéterminée

Lorsque le concepteur ne peut évaluer directement la solution i.e. déterminer si la contrainte (ou le critère) est respectée ou non, deux possibilités apparaissent:

- approfondir la solution considérée (i.e. rechercher de nouvelles implications),
- envisager successivement deux cas: celui où la contrainte (ou le critère) n'est pas respectée et celui où elle est respectée.

6. Recherche de versatilité

Lorsqu'une solution satisfait toutes les contraintes et tous les critères pertinents compte tenu du problème, le concepteur cherche à élargir son champ d'intérêt: le concepteur essaie d'identifier les avantages que présenterait cette solution dans d'autres situations, ce qui correspond à une évaluation de la solution en se référant à un critère de "versatilité" (terminologie des concepteurs).

Il est à noter que ces caractéristiques sont propres aux concepteurs expérimentés dans le domaine. En effet, des concepteurs non expérimentés dans un domaine ne connaissent pas nécessairement les solutions standards qui y sont développées (dans le cas du problème nouveau, seuls les sujets expérimentés ont évalué les solutions en recherchant leurs similitudes avec la solution standard). L'opérationnalisation des critères sous la forme de contraintes apparaît elle aussi limitée aux concepteurs qui connaissent le domaine du problème (difficultés d'évaluation des solutions du problème nouveau par des concepteurs non expérimentés). De même, l'évaluation de la pertinence des critères et des contraintes provient essentiellement de concepteurs expérimentés. La résolution de sous-problèmes, réactive à une évaluation "négative", est elle aussi spécifique aux concepteurs expérimentés; ce qui corrobore et explique l'émergence de résolution coopérative des sous-problèmes lors de dialogues entre experts (cf. Bonnardel, 1990). Le champ de connaissances des concepteurs expérimentés leur permet aussi d'envisager plusieurs situations lorsqu'ils aboutissent à une évaluation indéterminée ainsi que d'identifier les avantages supplémentaires d'une solution déjà satisfaisante.

2 LA SÉLECTION DE SOLUTIONS

La deuxième étape de la tâche expérimentale proposée aux concepteurs consistait à sélectionner les solutions jugées les plus satisfaisantes. Il a été constaté (chapitre précédent) que la sélection s'effectue sur des solutions "pré-sélectionnées" i.e. des solutions qui ont été conservées après un premier test. Il s'agit dans le cas du problème nouveau de solutions qui sont considérées comme valides; dans le cas du problème traditionnel, de solutions qui ne nécessitent pas une technique inhabituelle (même si elle est concevable).

La sélection effectuée par les concepteurs reste cependant à approfondir en fonction de plusieurs objectifs:

- identifier les stratégies de sélection utilisées par les concepteurs,
- caractériser les solutions sélectionnées et expliciter les raisons de ces sélections en termes de critères prévalents.

2.1 Les Stratégies de Sélection de Solutions

Avant de caractériser les solutions sélectionnées, les stratégies de sélection mises en œuvre par les concepteurs vont être analysées pour chacun des problèmes.

2.1.1 Stratégies de sélection pour le problème traditionnel

Diverses stratégies sont mises en œuvre par les concepteurs. L'une d'elles est prépondérante (la stratégie 1 du tableau 8, employée par 11 sujets sur 14). Elle consiste à:

- a - Envisager différentes situations de mise en application d'une solution i.e., par exemple, une situation où une contrainte donnée est réellement "contraignante" et une situation où elle l'est relativement peu;
- b - Déterminer les caractéristiques de "la" solution préférable i.e. d'une solution qui satisfasse les contraintes importantes, caractéristiques de la situation définie en (a);
- c - Sélectionner parmi les solutions proposées, celle(s) qui correspond(ent) à la solution préférable définie en (b).

Type d'expertise	Ingénieur-Calculateur		Technicien-Dessinateur		Effectif
Niveau d'expertise	Exp pb trad	Non exp pb trad	Exp pb trad	Non exp pb trad	total
Type de stratégie					
Stratégie 1	1	5	2	3	11
Stratégie 2	0	1	1	0	2
Stratégie 3	1	0	0	0	1

Tableau 8: L'effet du type et du niveau d'expertise sur les stratégies de sélection de solutions pour le problème traditionnel

La stratégie majoritaire (stratégie 1) n'est soumise ni au type d'expertise des concepteurs, ni à leur niveau d'expertise dans le domaine.

Deux autres stratégies, utilisées par un nombre restreint de concepteurs, ont été identifiées:

- L'une (stratégie 2) consiste à: éliminer certaines catégories de solutions, sélectionner d'autres catégories puis réduire progressivement l'ensemble des solutions en rejetant certaines valeurs des attributs restants (i.e. pas encore considérés);
- L'autre (stratégie 3) consiste à: éliminer certaines catégories de solutions, considérer les solutions restantes, les ordonner en fonction de différents critères et réaliser un(des) compromis pour sélectionner une ou deux solutions. Cette façon de procéder - en particulier le fait d'ordonner les solutions en fonction de différents critères - se rapproche de la description de l'évaluation proposée par Richard (1990). Il est à noter qu'ici elle ne se

manifeste pas au cours de la phase d'évaluation proprement dite des solutions mais lors de la phase de sélection.

2.1.2 Stratégies de sélection pour le problème nouveau

Diverses stratégies sont mises en œuvre par les concepteurs. L'une d'elles apparaît prépondérante (cf. la stratégie 1 du tableau 9, utilisée par 10 sujets sur 14), et se révèle différente de celle majoritaire dans le cas du problème traditionnel. La stratégie majoritaire dans le cas du problème nouveau consiste à sélectionner directement une solution, en se référant à un ou plusieurs critères - en nombre réduit (quatre au maximum).

Type d'expertise Niveau d'expertise	Ingénieur-Calculateur		Technicien-Dessinateur		Effectif total
	Exp pb nouveau	Non exp pb nouveau	Exp pb nouveau	Non exp pb nouveau	
Type de stratégie					
Stratégie 1	3	4	0	3	10
Stratégie 2.1	1	0	0	0	1
Stratégie 2.2	0	0	2	0	2

Tableau 9: L'effet du type et du niveau d'expertise
sur les stratégies de sélection de solutions pour le problème nouveau

La stratégie majoritaire (stratégie 1) ne dépend ni du type d'expertise des concepteurs, ni de leur niveau d'expertise dans le domaine.

Deux autres stratégies sont mises en œuvre par un nombre restreint de sujets (cf. annexe 5). Une partie de leur cheminement est commun, aussi pouvons-nous supposer qu'il s'agit de variantes d'une même stratégie.

La première variante (stratégie 2.1 de la figure 4) consiste à prendre en compte certains critères pour sélectionner certaines solutions, puis à considérer un(des) critères supplémentaires pour retenir l'une des solutions.

La seconde variante (stratégie 2.2 de la figure 4) consiste à prendre en compte certains critères pour éliminer la(les) solutions les moins satisfaisantes et parvenir à la sélection de la solution la plus satisfaisante en considérant un (ou plusieurs) critères supplémentaires.

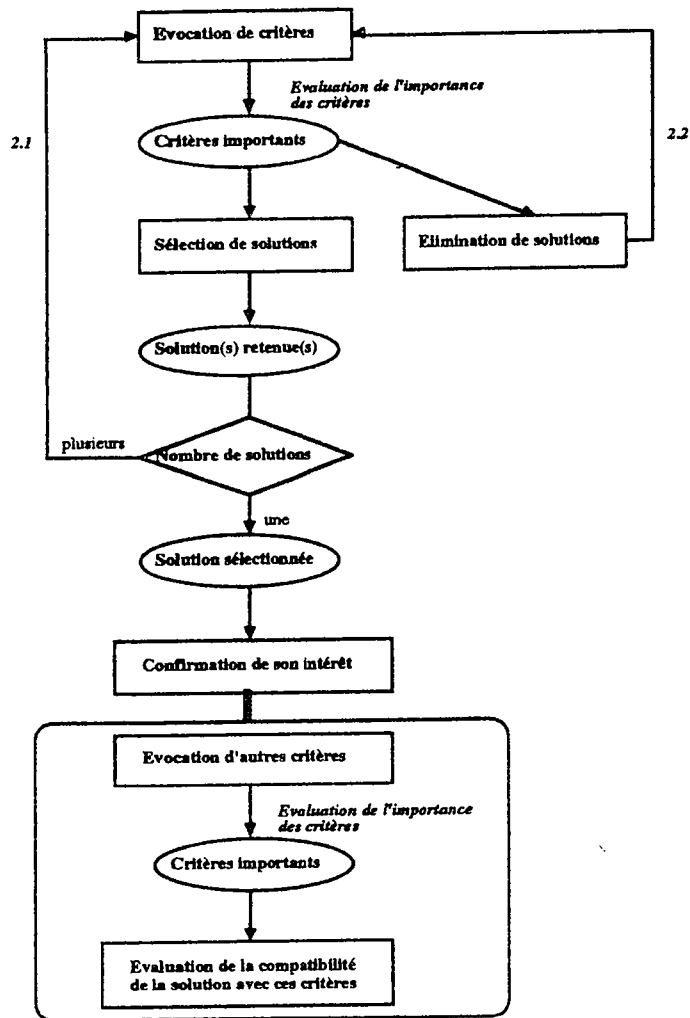
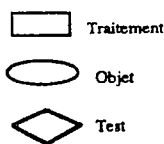


Figure 2: La stratégie de sélection 2 et ses variantes

Légende:



2.1 ou 2.2 indique les spécificités des variantes de la stratégie 2

Une alternative à la tâche de sélection a été observée: l'élaboration d'une solution nouvelle (cf. annexe 6). Ce processus est mis en œuvre par un seul concepteur: il s'agit d'un dessinateur non expérimenté dans le domaine du problème nouveau mais expérimenté dans celui du problème traditionnel. L'élaboration d'une solution nouvelle paraît reposer sur l'analyse de contraintes. Celles-ci jouent en effet un rôle d'orientation de l'attention (Bonnardel, 1989, p. 18) et permettent de définir des buts de conception (Zreik et Zeitoun, 1990). Elles sont aussi utilisées pour évaluer la solution élaborée et pour l'améliorer (Bonnardel, 1989).

Deux autres sujets ont, en plus de la sélection de l'une des solutions, proposé une solution différente de celles fournies. Il s'agit de deux sujets expérimentés dans le domaine du nouveau problème (un ingénieur et un dessinateur). La solution qu'ils proposent (individuellement) résulte de l'association de deux des solutions présentées. Un fait intéressant est qu'ils associent les deux mêmes solutions et aboutissent à la constitution d'une même solution, différente de celles présentées.

2.2 Les Solutions Sélectionnées

Les solutions sélectionnées sont caractérisées en fonction de:

- leur quantité par sujet et pour chaque problème,
- leur diversité,
- des raisons (en terme de critères) qui justifient ces sélections.

2.2.1 La quantité de solutions sélectionnées

Dans le cas du problème traditionnel, les concepteurs sélectionnent deux (ou trois) solutions alternatives. Ils se réfèrent pour cela à une même contrainte mais ils envisagent deux cas: soit la contrainte est réellement contraignante, soit elle l'est relativement peu.

L'importance de la contraintes étant ainsi postulée, la sélection finale s'effectue en fonction des options envisagées.

Exemples:

"si contrainte de masse importante" -> solution 2

"si contrainte de masse peu importante" -> solution 20

"si nombre d'exemplaires limité" -> solution 2

"si nombre d'exemplaires important" -> solution 20

Cette sélection de solutions alternatives est consécutive à l'analyse des spécifications du problème. Contrairement aux spécifications habituelles, la définition du problème traditionnel n'intègre pas les valeurs précises des exigences. Aussi les concepteurs envisagent-ils différents résultats possibles lors d'une évaluation de l'importance des contraintes prescrites.

Dans le cas du problème nouveau, les concepteurs sélectionnent une seule solution. Les spécifications de ce problème étant instantiées, les concepteurs peuvent directement déterminer dans quelle mesure les contraintes prescrites (définies à partir des spécifications) sont contraignantes. Pour cela, ils évaluent l'importance des contraintes prescrites en se référant à des connaissances de cas antérieurs.

Exemple:

Une contrainte prescrite de 0,3 mm. par rapport à la surface théorique est estimée difficile à tenir. Cette évaluation s'effectue en se référant à un problème déjà traité ("sur Télécom 2, on devait avoir 0,2 mm. de précision et c'était déjà difficile, alors là...").

2.2.2 La diversité des solutions sélectionnées

La diversité des solutions sélectionnées pour chacun des problèmes est indiquée sur le tableau 10.

Problème ACU	Problème Rf.R.
11 sur 24 .46 soit .83	5 sur 6 soit

Tableau 10: L'effet du type de problème sur la diversité des solutions sélectionnées
(par rapport au nombre de solutions proposées)

La sélection de solutions pour le problème traditionnel apparaît moins diversifiée que celle des solutions du problème nouveau. Afin d'expliquer cette différence, les caractéristiques des solutions sélectionnées par les concepteurs pour chacun des problèmes vont être recherchées.

2.2.2.1 Les solutions sélectionnées pour le problème traditionnel

Les concepteurs ayant sélectionné chacun une ou deux solutions, les solutions sont caractérisées par le nombre total de sélections dont elles sont l'objet (les résultats détaillés des 1er et 2d choix de solutions sont présentés dans l'annexe 7, tableau II). Les facteurs "type d'expertise" et "niveau d'expertise dans le domaine" étant susceptibles d'influer sur la sélection de solutions, les choix des différents types de concepteurs ont été distingués.

L'analyse des solutions sélectionnées pour le problème traditionnel met en évidence deux résultats généraux (cf. tableau 11):

1. Ni le type d'expertise des concepteurs, ni leur niveau d'expertise dans le domaine du problème traditionnel ne semblent influencer la sélection de solutions.

2. Plusieurs solutions différentes ont été sélectionnées.

Cela peut s'expliquer de plusieurs façons:

- si les concepteurs considèrent que la solution à sélectionner doit satisfaire certains critères et qu'il se réfèrent à des critères différents, il est vraisemblable qu'ils aboutissent à un choix de solutions différentes;
- par contre, s'ils se réfèrent aux mêmes critères, la sélection de solutions différentes ne peut s'expliquer que par une hiérarchisation différente des critères.

Solutions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Type de travail et niveau d'expertise																								
Ingénieurs Expérimentés ACU	X			X	X														X	X				
Ingénieurs expérimentés ACU	X	X	X		X													X		X	X			
Dessinateurs Expérimentés ACU	X	X																X		X				X
Dessinateurs expérimentés ACU	X	X																	X	X				X
Nombre de sélections	6	4	1	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	9	0	0	0	2

Tableau 11 : L'effet du type de travail et du niveau d'expertise sur la sélection de solutions du problème ACU

Légende : Les croix indiquent la (les) solutions sélectionnées par les sujets.
Les flèches rendent compte de l'ordre de défection lorsque plusieurs solutions ont été mentionnées.

Malgré le fait que les concepteurs sélectionnent des solutions différentes, deux types de solutions semblent regrouper les solutions les plus fréquemment sélectionnées:

- les solutions 1 et 2, qui sont l'objet de 10 sélections sur 28 (soit 36% des sélections),
- la solution 20, qui est l'objet de 9 sélections (soit 32% des sélections).

Ces solutions ont en commun plusieurs valeurs caractéristiques et ne sont opposées que sur un seul attribut descriptif: le matériau (en métal pour les solutions 1 et 2 vs en carbone pour la solution 20). Ce résultat permet de suggérer un principe directeur du choix des concepteurs: le choix d'un type de solution dépendrait de la priorité accordée aux critères liés à l'attribut descriptif "matériau" et de leur orientation pour générer les contraintes qui leur sont

associées. Certains de ces critères ont pu être identifiés: la "masse" et l'"expérience industrielle".

a) Le critère de masse

Les solutions sélectionnées correspondent à deux situations envisagées par les concepteurs:

- une situation caractérisée par une contrainte de masse "peu contraignante", qui conduit au choix des solutions 1 ou 2,
- une autre situation caractérisée par une contrainte de masse "contraignante", qui conduit au choix de la solution 20.

Le même critère de masse a été utilisé pour envisager ces deux situations, mais il a été orienté de deux façons opposées (en fonction du caractère plus ou moins contraignant de la contrainte qu'il génère).

b) Le critère d'expérience industrielle

Un consensus apparaît dans le choix des valeurs des attributs autres que le matériau: les deux types de solutions prépondérantes sont caractérisés par les valeurs "cadres métalliques" et "liaison par boulons ou rivets". L'analyse des solutions habituellement développées pour les produits de type ACU montre que les concepteurs ont privilégié par leurs choix un critère d'"expérience industrielle", ce qui corrobore la démarche de sélection évoquée dans le paragraphe 1.3.1.

Les solutions apparaissent ainsi caractérisées par des attributs descriptifs et par des attributs évaluatifs (qui peuvent être composés à la fois de critères et de contraintes). Les attributs descriptifs seraient instantiés directement, en fonction de la description des solutions; les attributs évaluatifs seraient instantiés à l'issue de l'évaluation des valeurs prises par les attributs descriptifs des solutions.

Une exemple en est fourni pour les deux types de solutions préférentiellement sélectionnés par les concepteurs:

Solutions 1 & 2		Solution 20	
Attribut descriptif	Attributs évaluatifs	Attribut descriptif	Attributs évaluatifs
<u>matériau</u>	<u>masse</u>	<u>matériau</u>	<u>masse</u>
métal	lourde	carbone	légère
	<u>expérience industrielle</u>		<u>expérience industrielle</u>
	acquise		acquise

2.2.2.2 Les solutions sélectionnées pour le problème nouveau

Les solutions sélectionnées pour le problème nouveau apparaissent plus dispersées que celles sélectionnées pour le problème traditionnel, ce qui corrobore l'estimation de la diversité des solutions.

Solutions Type de travail et niveau d'expertise	1	2	3	4	5	6
Ingénieurs Expérimentés Réflecteurs	X X			X X		
Ingénieurs → expérimentés Réflecteurs		X	X			
Dessinateurs Expérimentés Réflecteurs	X	X				
Dessinateurs → expérimentés Réflecteurs	X		X		X	
Nombre de sélections	4	2	3	2	1	0

Tableau 12 : L'effet du type de travail et du niveau d'expertise sur la sélection de solutions du problème Rf.R.

Légende : Chaque croix indique la solution sélectionnée par un sujet

Note : 13 croix au lieu de 14 - le nombre de sujets - sont portées sur le tableau car l'un d'eux a élaboré une solution nouvelle au lieu de sélectionner l'une des solutions présentées

L'identification des caractéristiques des solutions montre cependant que les solutions les plus fréquemment choisies appartiennent à la famille des solutions "à tricot" (solutions 1 à 3 du tableau 12). Les solutions sélectionnées ressemblent par cette caractéristique à la solution "standard" utilisée dans le domaine des réflecteurs; cela traduit la prévalence du critère "*expérience industrielle*".

Solutions 1, 2 & 3

Attribut descriptif

surface réfléchissante

tricot

Attributs évaluatifs

expérience industrielle

acquise

La sélection de solutions réellement nouvelles, telle la solution 4 (solution nécessitant des études approfondies et un développement) provient de deux ingénieurs expérimentés. Une autre solution non traditionnelle (la solution 5) a été sélectionnée par un dessinateur non expérimenté mais il faut noter que cette solution a été considérée comme ne constituant pas une solution à part entière par 9 sujets sur 14.

Le critère "expérience industrielle" régit donc la sélection de solutions pour chacun des problèmes. Afin d'identifier d'autres critères intervenant dans la sélection de solutions, des justifications de leurs choix ont été demandées aux concepteurs.

2.2.3 Les justifications des solutions sélectionnées

L'analyse des justifications des solutions sélectionnées pour le problème traditionnel et de celles sélectionnées pour le problème nouveau a permis d'identifier les arguments décisionnels communs aux deux problèmes et ceux qui leur sont spécifiques (cf. tableaux 13 et 14).

• *Les arguments décisionnels communs aux deux problèmes:*

- *L'expérience industrielle*

La prévalence de ce critère est confirmée:

- il constitue l'argument le plus cité pour la sélection de solutions du problème traditionnel et pour celle du problème nouveau,
- il caractérise les solutions sélectionnées préférentiellement pour les deux problèmes i.e. les solutions 1, 2 et 20 pour le problème traditionnel, les solutions 1, 2 et 3 pour le problème nouveau.

Un pré-requis pour la sélection de solutions est ainsi identifié: toute solution doit bénéficier d'expérience industrielle pour pouvoir être sélectionnée.

- *La masse*

Selon l'orientation que prend cet argument décisionnel dans le cas du problème traditionnel (i.e. si la masse est contraignante ou non), les concepteurs choisissent un type de solutions ou un autre. La masse est aussi prise en compte dans le cas du problème nouveau où deux solutions préférentielles (les solutions 1 et 2) respectent la contrainte de limitation de la masse.

- *La limitation des risques*

La contrainte de "limitation des risques" est évoquée pour justifier le choix d'une solution préférentielle pour le problème traditionnel (la solution 20, qui est justifiée aussi par le critère correspondant de "fiabilité-sécurité") et de deux solutions préférentielles pour le problème

nouveau (les solutions 1 et 2). Une autre caractéristique souhaitée pour les solutions est ainsi identifiée: la limitation des risques ou la fiabilité.

Une partie de la signification véhiculée par le critère "fiabilité" et par la contrainte "limitation des risques" semble liée à la signification du critère "expérience acquise"; les relations existant entre ces trois arguments devront donc être identifiées.

• *Les arguments décisionnels spécifiques à chacun des problèmes*

- Le *délai*, qui a déjà été cité comme un critère spécifique au problème traditionnel, apparaît ici comme un argument orienté ("délai restreint") distinguant les solutions qui sont rapidement réalisables des autres solutions.

- Le *nombre d'exemplaires* apparaît aussi comme un argument déterminant du choix de solutions pour le problème traditionnel. Selon l'orientation de cet argument (i.e. la situation qu'il définit) un type de solutions ou l'autre est choisi (si nombre d'exemplaires important -> choix de la solution 20; si nombre d'exemplaires restreint -> choix des solutions 1 ou 2).

- Le respect de la contrainte de *limitation du nombre d'éléments* (instanciée éventuellement avec les éléments "actuateurs") justifie le choix des trois solutions préférentiellement sélectionnées pour le problème nouveau et les distingue des autres solutions.

◊ L'analyse des arguments décisionnels pris en compte par les concepteurs permet de retracer certaines étapes de la sélection de solutions.

• *Sélection de solutions pour le problème traditionnel*

Les solutions satisfaisantes pour le problème traditionnel peuvent être cernées grâce à la combinaison des arguments décisionnels "expérience acquise" et "délai" (i.e. les solutions 1, 2 et 20 sont ainsi retenues). Le choix entre les deux types de solutions dépend ensuite de la "masse" puis du "nombre d'exemplaires". Ces quatre arguments interviennent dans la sélection de solutions mais semblent assurer des fonctions différentes:

- l'expérience acquise joue le rôle de pré-requis,
- le délai, instancié par "délai restreint" (de réalisation de la solution), joue le rôle de condition à satisfaire,
- la masse et le nombre d'exemplaires ne sont pas orientés a priori et définissent des situations différentes pour lesquelles les solutions appropriées doivent être déterminées.

Il est à noter que le délai et la masse se retrouvent dans la définition du problème traditionnel sans que leurs valeurs soit spécifiées ("date de livraison des modèles" et "masse maximale"); cependant les concepteurs instantient unidirectionnellement le délai avec la valeur "restreint" alors que la masse est instantiée de deux façons opposées ("contraignante" ou "non

Solutions	1	2	3	5	9	18	19	20	24	Total
Justifications										
<i>Expérience industrielle</i>	3	1	-	-	-	1	-	4	-	9
(Si) délai restreint	3	2	-	-	-	-	-	1	-	6
Si nbre d'exemplaires restreint	1	1	-	-	-	-	-	-	1	3
Si contrainte de masse peu impte	2	1	-	-	-	-	-	-	-	3
Si faible hauteur ACU	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Diminution-Gain de masse	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2
Bon compromis coût/perf.en masse	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Rapport rigidité/masse	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Fiabilité-Sécurité	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Bonne liaison	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
<i>Précision</i>	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Bonne géométrie	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Facilité de mise en œuvre	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Charges à supporter plus imptes	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Si contrainte de masse impte	-	-	-	1	-	-	-	3	1	5
<i>Limitation du coût</i>	-	-	1	1	-	-	-	-	1	3
<i>Limitation des risques</i>	-	-	-	1	-	-	-	2	-	3
<i>Simplicité</i>	1	-	-	-	1	-	-	-	-	2
<i>Versatilité</i>	-	-	-	-	-	1	-	1	-	2
Si nbre d'exemplaires important	-	-	-	-	-	-	-	1	1	2
Possibilité hauteur ACU impte	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
Rapport masse/résistance	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
Passage d'efforts	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1

Tableau 13: Effectif de concepteurs et arguments évoqués pour justifier la sélection de solutions pour le problème traditionnel

Légende:

Les justifications communes et celles spécifiques aux deux types de solutions préférentielles ont été regroupées.

En italique: les justifications communes aux deux problèmes

Les arguments décisionnels communs aux solutions 1 & 2 et 20 sont présentés dans la 1ère partie du tableau; les arguments décisionnels spécifiques aux solutions 1 ou 2 sont ensuite présentés puis ceux spécifiques à la solution 20 et enfin les arguments décisionnels évoqués indifféremment pour toutes les solutions.

Solutions	1	2	3	4	5	Total
Justifications						
<i>Expérience industrielle</i>	2	2	1	-	-	5
Limitation du nbre d'éléments-d'actuateurs	3	1	1	-	-	5
<i>Précision du profil</i>	2	-	-	-	-	2
Limitation de la <i>masse</i>	1	1	-	-	-	2
<i>Limitation du coût</i>	1	-	-	-	-	1
Faisabilité	1	-	-	-	-	1
Facilité de calcul	1	-	-	-	-	1
Suppression de l'effort latéral	-	-	1	-	-	1
<i>Versatilité</i>	1	1	-	1	-	3
<i>Limitation des risques</i>	1	1	-	-	-	2
<i>Fiabilité</i>	-	-	-	1	-	1
Homogénéité de la déformée	-	-	-	2	-	2
Bonne maîtrise de la déformée	-	-	1	-	-	1
Compacité de l'antenne	-	-	-	1	-	1
<i>Simplicité de réalisation</i>	-	-	-	-	1	1

Tableau 14: Effectif de concepteurs et arguments évoqués pour justifier la sélection de solutions pour le problème nouveau

Légende:

Les justifications spécifiques aux trois solutions préférentielles ont été regroupées (à l'exception de la justification "limitation des risques" qui semble associée à la "fiabilité").

En italique: les justifications communes aux deux problèmes.

Les arguments décisionnels spécifiques aux solutions 1, 2 & 3 sont présentés dans la partie supérieure du tableau et sont ainsi dissociés des arguments décisionnels évoqués indifféremment pour toutes les solutions.

contraignante"). Le nombre d'exemplaires, qui constitue une spécification potentielle du problème, n'entrait pas dans la définition du problème traditionnel mais a été rajouté par les concepteurs. Il se trouve lui aussi instantié de deux façons opposées ("nombre d'exemplaires restreint" et "nombre d'exemplaires important").

Les phases d'intervention de ces arguments au cours de la sélection des solutions du problème traditionnel sont retracées sur la figure 5.

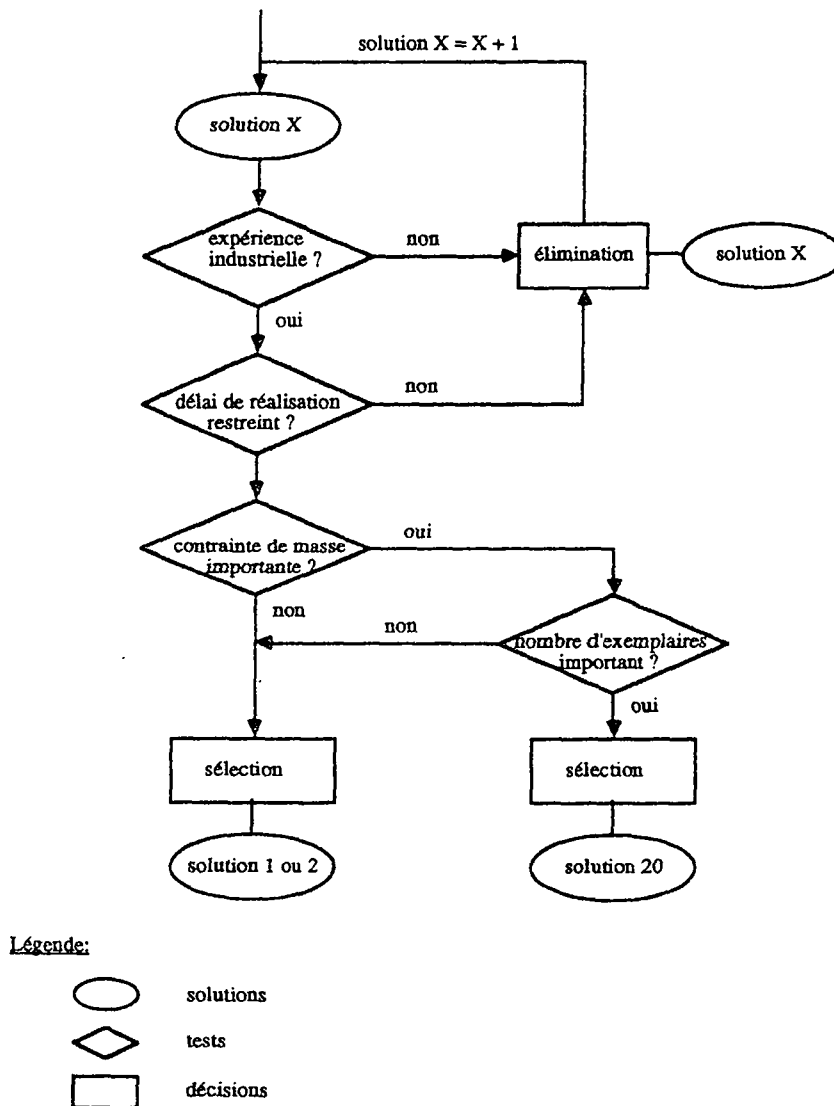


Figure 5: Etapes de sélection de solutions pour le problème traditionnel

• *Sélection de solutions pour le problème nouveau*

Les arguments décisionnels pris en compte dans le cas du problème nouveau intègrent le pré-requis "expérience acquise" (déjà identifié dans le cas du problème traditionnel) ainsi que plusieurs conditions. Chaque solution qui ne satisfait pas le pré-requis ni les conditions choisies est éliminée (cf. figure 6).

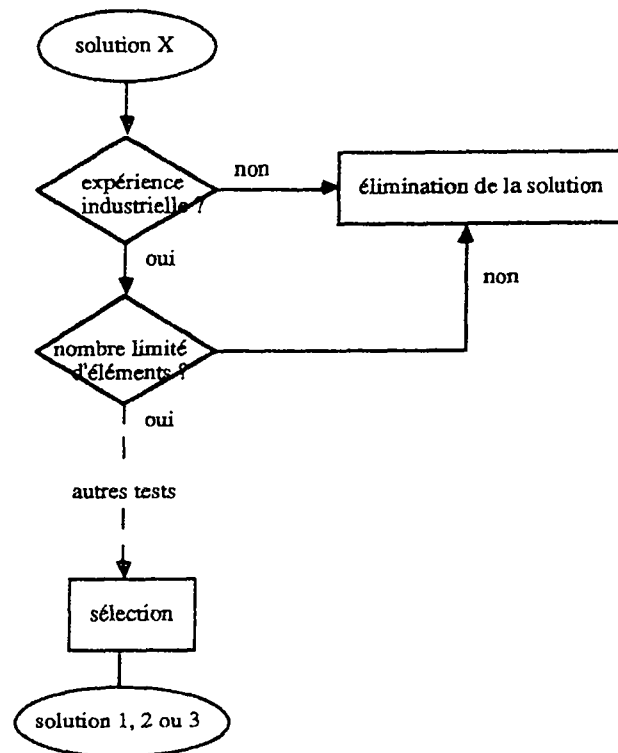


Figure 6: Etapes de sélection de solutions pour le problème nouveau

• Une limitation de ces éléments de modélisation de l'activité de sélection peut cependant être soulignée: l'analyse des justifications fournies par chaque concepteur montre que des critères différents sont évoqués pour justifier la sélection d'une même solution (cf. tableaux III et IV de l'annexe 7). Plusieurs hypothèses explicatives peuvent être émises à ce propos:

1. Une solution peut être sélectionnée sans que soient pris en considération tous les attributs qu'elle satisfait (ou ne satisfait pas) mais seulement certains d'entre eux; aussi les arguments définis précédemment peuvent ne pas être tous considérés par les concepteurs mais seulement certains d'entre eux.

2. Les justifications fournies par les concepteurs peuvent ne pas être exhaustives; une solution satisferait (ou ne satisferait pas) de nombreux critères dont quelques-uns seulement sont mentionnés par chaque sujet.

Dans ces deux cas, les critères indiqués par les concepteurs seraient ceux auxquels ils accordent le plus d'importance et leur avis diffèrerait quant à l'importance relative des critères.

3. Bien que différents, les critères cités peuvent être "parents" et situés à des niveaux différents.

Cette dernière hypothèse pourra être éventuellement corroborée par l'analyse de relations entre critères.

◊ L'analyse des justifications a mis en évidence l'existence de plusieurs types d'arguments intervenant dans la sélection de solutions:

1. *Les contraintes*, qui peuvent constituer aussi bien des données évaluatives et sélectives que des données de conception (i.e. des données prises en considération par le concepteur pour générer des solutions).

Exemples: "limiter le nombre d'éléments", "limiter les risques".

2. *Les critères*, qui constituent des données évaluatives et sélectives mais dont l'intervention (ou non) lors de la génération de solutions reste à déterminer.

Exemple: "expérience industrielle", "fiabilité".

3. *Les situations conditionnelles* (identifiées spécifiquement dans le cas du problème traditionnel, probablement en raison de l'absence d'instantiation de ses spécifications)
Lorsque le concepteur ne dispose pas de toutes les informations nécessaires pour trancher entre plusieurs solutions, il envisage plusieurs situations - définies sous une forme conditionnelle - en fonction desquelles il évalue les solutions et sélectionne celles adéquates.

4. *Les compromis ou rapports entre deux critères* (identifiés uniquement dans le cas du problème traditionnel mais probablement généralisables à d'autres problèmes de conception). Les compromis ou les rapports entre critères peuvent être spécifiques à l'activité d'évaluation et de sélection mais cette hypothèse devra être validée; en outre, la possibilité de compromis entre des critères plus nombreux devra être recherchée.

3 LES CRITERES ET LES CONTRAINTES EVOQUES

Au cours des phases d'évaluation et de sélection de solutions, les concepteurs devaient spécifier les "critères" auxquels ils se référaient. Le terme "critère" était utilisé de façon générale puisqu'il renvoyait indifféremment aux critères, aux contraintes et aux éventuels autres éléments pris en compte par les concepteurs pour l'évaluation et/ou la sélection de solutions. Ces différents éléments vont tout d'abord être désignés sous le terme générique d'"attribut évaluatif" afin de les analyser quantitativement. Ils seront ensuite l'objet d'une analyse qualitative, au cours de laquelle nous proposerons une définition des "critères" et des "contraintes" (les acceptions de ces termes, présentées au début de ce rapport, seront ainsi précisées).

Le choix du terme "attribut évaluatif" nous semble justifié par le fait que les critères, contraintes et autres éléments utilisés par les concepteurs permettent de caractériser les solutions d'un point de vue évaluatif; de même qu'elles pourraient être caractérisées d'un point de vue descriptif par des attributs descriptifs (il se peut d'ailleurs que certains attributs puissent être utilisés dans le cadre de ces deux points de vue à la fois). Ces attributs évaluatifs peuvent de plus admettre des valeurs qui spécifient les résultats de l'évaluation (exemple: masse -> légère), de même que les attributs descriptifs admettent des valeurs spécifiant la description des solutions (exemple: matériau -> carbone).

3.1 Analyse Quantitative

3.1.1 Hypothèse

Les concepteurs expérimentés dans le domaine du problème présenté sont censés savoir caractériser "la" solution préférable et donc connaître les critères qu'elle doit satisfaire. Ils pourront donc évoquer ces critères pour évaluer les solutions présentées.

Les concepteurs non expérimentés dans le domaine du problème risquent par contre de ne pas savoir caractériser la solution préférable et donc de n'évoquer qu'un nombre restreint de critères.

L'hypothèse suivante peut donc être émise: *les concepteurs expérimentés dans le domaine citeront davantage de critères que ceux non expérimentés.*

Cette hypothèse doit cependant être modulée dans le cas du problème traditionnel: ce problème étant connu dans le bureau d'étude, les concepteurs, même non expérimentés dans le domaine, connaissent - tout au moins globalement - la solution standard utilisée. Ils peuvent donc être en mesure de caractériser "la" solution préférable associée à ce problème. Cela pourrait leur permettre d'évoquer la plupart des critères nécessaires à l'évaluation des solutions présentées.

Un effet d'interaction entre les facteurs "niveau d'expertise dans le domaine" et "type de problème" est donc susceptible d'apparaître: *l'influence du niveau d'expertise dans le domaine peut être plus marquée dans le cas du problème nouveau que dans celui du problème traditionnel.*

3.1.2 Influence du type d'expertise des concepteurs et de leur niveau d'expertise dans le domaine sur le nombre d'attributs évaluatifs cités

Les productions des concepteurs ont permis d'identifier les attributs évaluatifs auxquels ils se réfèrent et de calculer le nombre moyen d'attributs évaluatifs cités: les concepteurs citent un nombre restreint d'attributs évaluatifs, quel que soit le problème traité (8 en moyenne pour le problème traditionnel; 6 en moyenne pour le problème nouveau).

Les effets du type et du niveau d'expertise dans le domaine sur le nombre moyen d'attributs évaluatifs cités ont été recherchés pour chacun des problèmes (cf. tableaux 15 et 16).

Type d'expertise	Ingénieur-Calculateur	Technicien-Dessinateur
Niveau d'expertise		
Expérimentés pb trad	7	8,3
Non expérimentés pb trad	7,8	7,6

Tableau 15: L'influence du type et du niveau d'expertise dans le domaine sur le nombre moyen de critères cités, dans le cadre du problème traditionnel

Type d'expertise	Ingénieur-Calculateur	Technicien-Dessinateur
Niveau d'expertise		
Expérimentés pb nouveau	8,3	8,5
Non expérimentés pb nouveau	4,5	5

Tableau 16: L'influence du type et du niveau d'expertise dans le domaine sur le nombre moyen de critères cités, dans le cadre du problème nouveau

Plusieurs constatations ressortent de ces résultats:

1. Le type d'expertise des concepteurs ne semble pas influencer sur le nombre d'attributs évaluatifs cités, cela quel que soit le problème traité.
2. Le niveau d'expertise dans le domaine influe sur le nombre d'attributs évaluatifs cités dans le cas du problème nouveau mais pas dans celui du problème traditionnel: les concepteurs expérimentés dans le domaine du problème nouveau citent davantage d'attributs évaluatifs que ceux non expérimentés.

L'hypothèse émise précédemment (effet du niveau d'expertise dans le cas du problème nouveau) est donc vérifiée. Elle peut s'expliquer par le fait que les concepteurs non expérimentés dans le domaine, ignorant les attributs (descriptifs et évaluatifs) caractéristiques de la solution "satisfaisante", limitent leur évaluation à quelques attributs évaluatifs probablement issus de leur propre domaine d'expertise. Une grande partie de ces sujets étant constituée de concepteurs expérimentés dans le domaine du problème traditionnel, il est possible qu'ils "ré-utilisent" certains attributs évaluatifs utilisés ou utilisables dans le cas du problème traditionnel. La solution standard du problème traditionnel servirait donc de référence pour évaluer certains aspects des solutions envisagées pour le problème nouveau.

3.2 Analyse Qualitative

L'analyse qualitative a pour objectif d'identifier:

- la démarche des concepteurs lors de la constitution de la liste d'attributs évaluatifs utilisés,
- la nature de ces attributs évaluatifs, et, pour ce faire, de proposer une définition des critères et des contraintes.

3.2.1 Ajout d'attributs évaluatifs

La constitution par les concepteurs de la liste d'attributs évaluatifs utilisés donne lieu à une constatation inattendue: ils adjoignent d'autres critères (qu'ils n'ont pourtant pas employés) à la liste d'attributs évaluatifs réellement utilisés.

Plusieurs hypothèses explicatives peuvent interpréter ce résultat:

1. Les concepteurs peuvent disposer de "schémas" correspondant aux solutions "préférables" (ou solutions "standards") pour certains problèmes connus. Ces schémas comporteraient à la fois des attributs descriptifs (ex: matériau) et des attributs évaluatifs (ex: fiabilité). Ces schémas seraient activés (sous une forme non instantiée) pour caractériser les solutions proposées lors de l'expérience. Les attributs descriptifs seraient directement instantiés lors de l'appréhension des solutions proposées. Par contre les attributs évaluatifs ne seraient instantiés qu'à l'issue de l'évaluation des différents aspects des solutions (notamment chez les concepteurs non expérimentés dans le domaine du problème considéré). La mise en œuvre d'une activité de contrôle, soit spontanément au cours de l'évaluation des solutions, soit induite par la demande de constitution de la liste d'attributs évaluatifs (demandée à l'issue de l'évaluation), leur permettrait d'évaluer l'exhaustivité des attributs évaluatifs (i.e. de vérifier que tous les attributs du schéma ont été pris en considération). Lors de constatation d'oubli(s), les concepteurs pourraient revenir sur des solutions déjà évaluées pour les "ré-évaluer" en se référant à d'autres attributs évaluatifs (s'ils sont en cours de réalisation de la tâche

d'évaluation; cf. chapitre I) ou compléter la liste d'attributs évaluatifs (s'ils ont terminé la tâche d'évaluation).

2. Les concepteurs peuvent percevoir différemment la tâche qu'ils effectuent au cours de l'évaluation des solutions et la tâche qu'ils réalisent à la fin de l'évaluation:

- en cours d'évaluation, les concepteurs peuvent évoquer des attributs évaluatifs spécifiques au problème considéré et à ses solutions,
- à la fin de l'évaluation, ils peuvent chercher à évoquer des attributs évaluatifs plus généraux (i.e. valables pour d'autres problèmes et d'autres solutions que ceux et celles présentés(ées)).

3.2.2 Les attributs évaluatifs utilisés: critères et contraintes

Les attributs évaluatifs cités par les concepteurs ont été inventoriés et sont rapportés sur le tableau 17 (et avec davantage de précisions dans l'annexe 8). Ils sont inventoriés tout d'abord en fonction de leur ordre de fréquence pour les deux problèmes à la fois, puis sont présentés les attributs évaluatifs cités spécifiquement pour le problème traditionnel et pour le problème nouveau.

Les attributs évaluatifs et les commentaires des concepteurs ont été analysés afin de proposer quelques éléments de définition pour distinguer les critères et les contraintes.

3.2.2.1 Critères conceptuels et contraintes opérationnelles

- La principale dimension distinctive des critères et des contraintes repose sur une hiérarchie d'abstraction:
 - les critères sont conceptuels i.e. réfèrent aux propriétés globales des solutions (exemple: la fiabilité)
 - les contraintes sont opérationnelles i.e. spécifient concrètement les caractéristiques techniques des solutions.

Ainsi certains attributs évaluatifs du tableau 17 sont ainsi directement applicables pour traiter les solutions (par exemple, "limiter le nombre d'éléments"). Ils sont donc opérationnels et correspondent à des contraintes. D'autres attributs évaluatifs du tableau 17 font référence à des notions plus générales (par exemple, la "simplicité de réalisation"). Ils sont donc de nature conceptuelle et correspondent à des critères.

- En raison de leur nature conceptuelle, il se peut que les critères doivent être interprétés de façon opérationnelle i.e. sous la forme de contraintes (dites "construites" car résultant de l'expérience acquise par les concepteurs"). Par exemple, le critère "masse" peut être interprété par la contrainte "utiliser un matériau léger". Les critères se manifesteraient donc indirectement sous une

forme opérationnelle lorsqu'ils permettraient de générer des contraintes "construites" (par exemple, "en raison de critères de coût et de fiabilité, il faut limiter le nombre d'éléments").

Attributs évaluatifs	Pb traditionnel	Pb nouveau	Total
Facilité/Simplicité de réalisation	13	9	22
Coût 13	7	20	
<i>Masse (Performance/masse)</i>	14	5	19
Expérience industrielle	9	8	17
Fiabilité -> Limiter les risques	10	7	17
<i>Résistance/Tenue aux efforts/Charges</i>	7	3	10
<i>Rigidité/Raideur/Exigences fréquentielles</i>	6	3	9
<i>Précision/Tolérances</i>	2	7	9
Faisabilité	2	7	9
Versatilité / Nombre d'exemplaires	6	3	9
Facilité/Simplicité de liaison	4	4	8
Homogénéiser (la structure ou la déformée)	3	2	5
Facilité de dimensionnement/ de calcul	2	2	4
Unicité (de la pièce) / Compacité (de l'antenne)	1	2	3
Maîtrise à long terme	1	1	2
Délai (de livraison, de développement)	11	-	11
<i>Hauteur ACU</i>	2	-	2
<i>Métallisation (des éléments mécaniques)</i>	2	-	2
<i>Limiter le nombre d'actuateurs</i>	-	6	6
<i>Limiter le nombre d'éléments</i>	-	5	5
<i>Exigences R.F.</i>	-	4	4
Intérêt/Utilité	-	3	3

Tableau 17: L'effet du type de problème sur l'effectif de concepteurs citant les critères et les contraintes.

Notes: L'effectif de concepteurs est de 14 quel que soit le problème.

En *italique* : les contraintes prescrites i.e. issues de spécifications. Leur formulation complète nécessite de rajouter "respecter..." ou "tenir..." aux noms portés sur le tableau ou de les verbaliser. Exemples:

"respecter les exigences fréquentielles", "métalliser (les éléments mécaniques)".

Ainsi certains attributs évaluatifs cités permettent d'identifier un critère et la(les) contrainte(s) correspondante(s): le critère "fiabilité" et les contraintes "limiter les risques" et "limiter le nombre d'éléments".

D'autres attributs évaluatifs font uniquement référence à un critère. L'énonciation fréquente d'un critère sans que la contrainte correspondante soit spécifiée peut résulter de deux caractéristiques:

- la formulation du critère est plus brève que celle de la(des) contrainte(s) correspondante(s).
- l'interprétation opérationnelle des critères ne pose aucune difficulté aux concepteurs spécialistes du domaine (cette interprétation peut d'ailleurs s'effectuer de façon automatique, et donc être inconsciente pour eux). Par contre, l'opérationnalisation de certains critères peut être difficile pour des concepteurs novices dans le domaine, et a fortiori pour des personnes extérieures au domaine considéré (par exemple, à partir de quelles bases concrètes apprécier la "faisabilité" ou l'"intérêt" d'une solution?").

Afin de permettre la génération de contraintes opérationnelles, les critères doivent être orientés i.e. qu'ils doivent définir l'orientation que prennent les contraintes qui leur sont associées. Cette orientation peut être explicite ou implicite. Par exemple:

- le critère de fiabilité intègre explicitement l'orientation de limitation des risques;
- le critère de masse pourrait par contre admettre plusieurs orientations (limitation ou augmentation de la masse) or il apparaît orienté de façon sous-jacente puisqu'il permet de définir des contraintes véhiculant l'idée de légèreté.

• Les contraintes résultent de l'opérationnalisation d'éléments variés. Trois sortes de contraintes, déjà définies en fonction de leur origine, peuvent être aussi caractérisées en fonction des éléments qu'elles permettent d'opérationnaliser:

1. Les contraintes prescrites (en italique sur le tableau 17) proviennent de l'opérationnalisation de certaines spécifications du problème (par exemple, "métalliser les éléments mécaniques", "respecter les exigences fréquentielles").

Les contraintes prescrites citées par les concepteurs ont été l'objet d'une analyse quantitative: elles apparaissent en quantité restreinte par rapport à l'ensemble des attributs évaluatifs évoqués (6 contraintes prescrites sur un total de 18 attributs évaluatifs pour le problème traditionnel, soit 33%; 4 contraintes prescrites sur un total de 19 attributs évaluatifs pour le problème nouveau, soit 21%). La majeure partie des attributs évaluatifs ne provient donc pas des spécifications du problème mais de l'opérationnalisation d'autres éléments.

2. Les contraintes construites proviennent de l'opérationnalisation de critères (par exemple, la contrainte "limiter les risques" correspond au critère "fiabilité").

Acquis par l'expérience et stockés en mémoire à long terme (d'où leur prépondérance chez les experts), les critères sont activés par les concepteurs pour traiter le problème considéré.

Certains critères sont cités sous leur formulation initiale alors que d'autres sont traduits sous la forme de contraintes construites (Par exemple: "On a toujours intérêt à *limiter*, pour des questions de coût et de fiabilité le nombre d'éléments "; en caractères soulignés: les critères; en caractères *italiques*: la contrainte construite).

3. Les contraintes déduites proviennent de l'opérationnalisation d'implications d'autres contraintes et/ou d'implications de l'état de résolution; elles sont donc définies en cours de réalisation de la tâche. Par exemple, identifier une solution à tricot parmi celles proposées suscite la génération de la contrainte déduite "homogénéiser la déformée". Cette contrainte n'étant pas évidente à respecter avec une solution à tricot, elle joue pleinement un rôle contraignant pour les concepteurs.

• L'analyse de la provenance des contraintes et de celles des critères suggère une "génération mutuelle" de critères et de certaines contraintes

Certaines contraintes (les contraintes construites) ont été décrites comme étant générées à partir de critères: les critères, progressivement construits par le concepteur et stockés en mémoire, peuvent être activés afin d'être opérationnalisés sous la forme de contraintes construites.

Inversement la construction de critères peut résulter de la prise en compte répétitive de contraintes, pour traiter systématiquement les mêmes attributs des problèmes. Elles peuvent, par un mécanisme d'abstraction, perdre leur caractère opérationnel et spécifique à un problème donné pour revêtir une forme conceptuelle (tout en conservant leur orientation) et ainsi permettre la génération de critères. Par exemple, un concepteur débutant, systématiquement confronté à des contraintes prescrites du type "la masse doit être inférieure à x" ou "la masse maximale est de x", peut constater que x est toujours faible (compte tenu des produits à concevoir). Il peut alors abstraire le critère "masse", l'associer à la propriété "légèreté" et le stocker en mémoire. Ce critère pourra alors être activé pour traiter certains problèmes, et pourra être opérationnalisé par différentes contraintes construites qui permettront toutes de limiter la masse (orientation sous-jacente au critère "masse").

3.2.2.2 Généralité et spécificité des attributs évaluatifs

Certains attributs évaluatifs du tableau 17 ont été évoqués par des concepteurs différents et pour les deux problèmes, aussi les qualifions-nous de "généraux"; d'autres attributs évaluatifs ont été évoqués uniquement pour l'un des deux problèmes, aussi les qualifions-nous de "spécifiques". Cette distinction est cependant soumise à une restriction: le fait qu'un attribut évaluatif ne soit cité que pour un problème peut être induit par une pondération faible de cet

attribut évaluatif dans le cadre du second problème; cette donnée ne serait alors pas "réellement" spécifique au premier problème.

3.2.2.2.1 Les attributs évaluatifs spécifiques

- Trois attributs évaluatifs ont été cités spécifiquement pour le problème traditionnel:
 - Deux sont issus des spécifications du problème ("*hauteur ACU*" et "*métallisation des éléments mécaniques*") et leur formulation complète définit des contraintes prescrites ("*limiter la hauteur de l'A.C.U.*", "*métalliser les éléments mécaniques*");
 - Le troisième attribut évaluatif spécifique ("*délai de livraison*" ou "*délai de développement*") peut constituer un critère général (i.e. valable pour d'autres problèmes) mais il est propre à certaines étapes de conception et donc à certains niveaux d'abstraction des solutions de conception: il s'agit en l'occurrence de solutions situées à un niveau physique. Les solutions du problème nouveau se situant à un niveau conceptuel, les concepteurs se trouvent dans une étape antérieure à celle dans laquelle ils se trouvent avec le problème traditionnel: il s'agit d'une étape de sélection d'une solution de conception appropriée (avant de s'interroger sur le délai de réalisation qu'elle nécessitera).
- Quatre attributs évaluatifs ont été spécifiquement évoqués pour le problème nouveau:
 - Deux correspondent à certaines spécifications du problème ("*nombre d'actuateurs minimum*", "*surface active réfléchissante*") et donc à des contraintes prescrites ("*limiter le nombre d'actuateurs*", "*respecter les exigences R.F.*" i.e. de réflexion);
 - Le troisième attribut évaluatif spécifique ("*limiter le nombre d'éléments*") correspond à une contrainte construite⁵ qui, compte tenu des commentaires des concepteurs, semble générale même si elle ne se manifeste pas dans le cas du problème traditionnel);
 - Le quatrième attribut évaluatif spécifique ("*utilité*" ou "*intérêt*") peut consister en un critère général mais propre à certaines étapes de conception: celles où les solutions se situent à un niveau conceptuel. Aussi n'est-il pas évoqué dans le cas du problème traditionnel: ses solutions se situant à un niveau physique, elles correspondent à des options techniques d'un concept déjà validé et donc forcément considéré comme utile ou intéressant.

Différents aspects du problème contribuant au caractère spécifique de certaines contraintes ont pu être identifiés:

⁵ Son statut a été déterminé par les commentaires des concepteurs.

1. certaines particularités du produit à concevoir, éventuellement énoncées dans les spécifications du problème

exemples:

le respect des exigences R.F. (ou de réflexion) correspond à une contrainte prescrite liée à la fonction principale du réflecteur (exigence d'une surface réfléchissante).

la "limitation du nombre d'actuateurs" peut provenir d'une particularisation du critère général de "limitation du nombre d'éléments" et/ou d'une spécification du problème (et donc constituer une contrainte prescrite).

2. le niveau auquel se situent le problème et ses solutions

exemple: "l'intérêt" ou "l'utilité" correspondent à un niveau conceptuel d'appréciation des solutions.

3.2.2.2.2 Les attributs évaluatifs communs

Une grande partie des attributs évaluatifs portés sur le tableau 17 apparaît commune aux deux problèmes et aux différents types de concepteurs (15 sur un total de 18 pour le problème traditionnel et de 19 pour le problème nouveau). Parmi ces attributs évaluatifs communs, les plus cités sont: la simplicité/facilité de réalisation, le coût, la fiabilité et l'expérience industrielle.

En généralisant ce résultat, on peut supposer qu'un "noyau" d'attributs évaluatifs communs pourrait être transférable pour l'évaluation d'autres types de solutions du domaine aérospatial. Parmi ces attributs évaluatifs, certains peuvent être spécifiques à certaines étapes de l'activité de conception. Par exemple, la faisabilité qui apparaît importante dans le cas du problème nouveau (elle est citée par 7 concepteurs vs 2 dans le cas du problème traditionnel) peut constituer un critère propre à une étape de génération-évaluation de solutions conceptuelle (cf. aussi les exemples cités précédemment pour le problème traditionnel et pour le problème nouveau).

3.2.2.3 Critères destructifs et critères de classement

L'analyse des commentaires des concepteurs permet de distinguer les critères "destructifs" et les critères "de choix" ou "de classement", selon la terminologie des concepteurs (le terme "attribut évaluatif" n'apparaissant pas dans le vocabulaire des concepteurs, nous ne le conservons pas pour ce paragraphe, mais le terme de critère revêt ici une acception large, intégrant éventuellement les contraintes):

- les critères destructifs doivent obligatoirement être respectés pour qu'une solution soit retenue;

- les critères de choix ou de classement peuvent être respectés ou non (ou plus ou moins respectés) par les solutions; ils permettent ainsi de "qualifier" les solutions et de sélectionner les meilleures solutions parmi celles retenues.

Cette distinction corrobore celle proposée par Janssen et al. (1989) sous les termes de contraintes de validité (= critères destructifs) et de contraintes de préférence (= critères de choix ou de classement).

Cette distinction entre ces deux types de critères a permis d'appréhender certains résultats relatifs à leur fréquence et à leur pondération:

1. Les critères destructifs sont nettement moins souvent évoqués que les critères de classement. Ce résultat peut être induit par la situation expérimentale: les solutions envisagées pour chacun des problèmes sont considérées comme valides⁶ par le concepteur qui les a définies (i.e. chaque chef de service).
2. Après avoir constitué la liste des critères utilisés, il était demandé aux concepteurs de pondérer⁷ ces critères. Un résultat complémentaire a ainsi été mis en évidence: seuls les critères de classement peuvent être pondérés et non les critères destructifs (qui sont soit respectés, soit non-respectés).

3.4 Un Réseau de Critères et de Contraintes

L'analyse des productions (écrites et orales) des concepteurs met en évidence l'existence de relations entre critères, contraintes et éléments de solution.

1. Ces relations peuvent être représentées sous la forme d'un réseau comportant trois niveaux d'abstraction (cf. figures 7 et 8).

La structure critériale proposée (figure 8) présente les critères comme s'ils étaient tous situés au même niveau, cela afin d'en homogénéiser la présentation. Cela ne signifie cependant pas qu'ils revêtent la même importance ou qu'ils ont le même statut dans l'activité de conception (l'importance et le statut des critères dépendent d'ailleurs probablement de l'étape de conception où se situent les concepteurs). De même la structure des contraintes ne rend pas compte de leur importance, ni de leur statut mais reflète leur origine: elle rend compte des mécanismes qui ont permis de générer les trois types de contraintes considérés.

⁶ Certains concepteurs ont cependant déclaré "non-valide" l'une des solutions.

⁷ Eventuellement en les hiérarchisant d'abord.

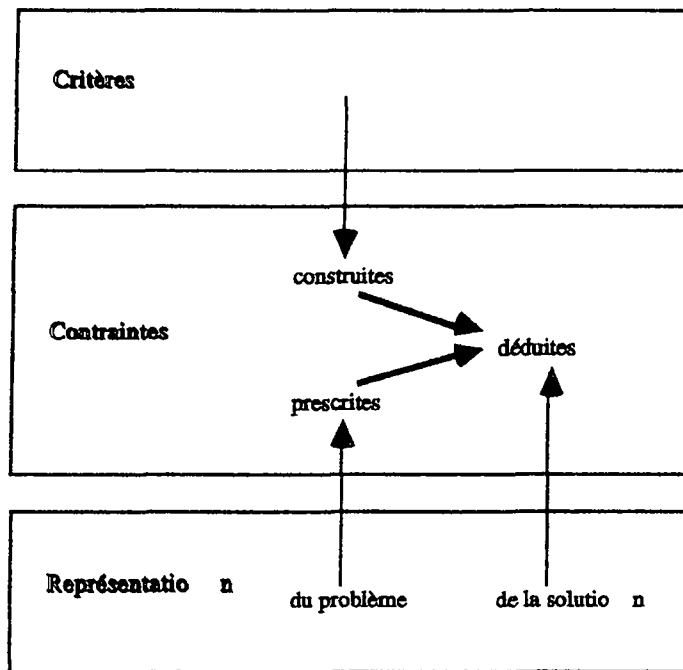


Figure 7: Trois niveaux d'abstraction (critères, contraintes, représentation du problème et de la solution)

Légende: les flèches rendent compte du mode de génération des diverses contraintes

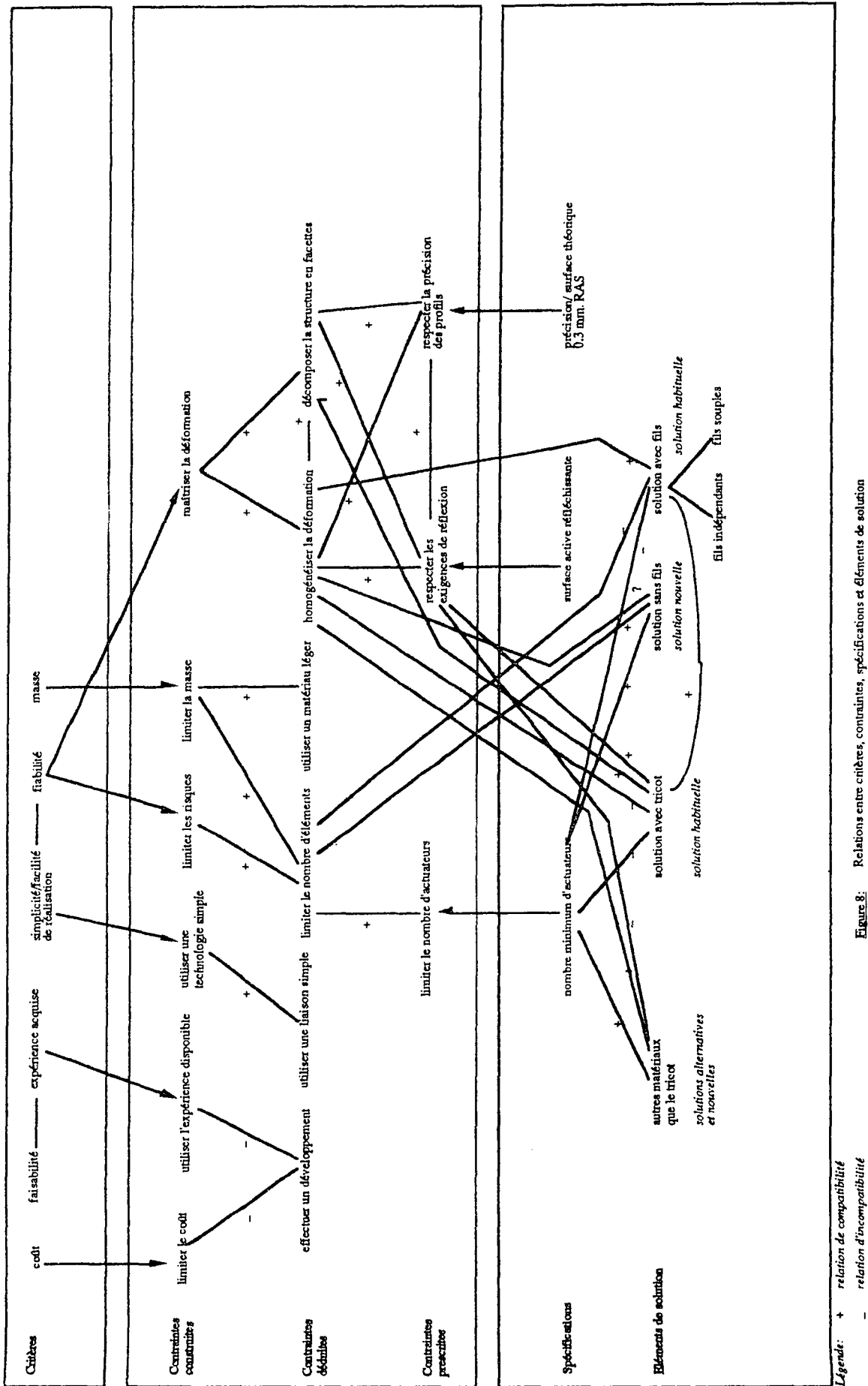


Figure 8: Relations entre critères, contraintes, spécifications et éléments de solution

2. Différents types de relations entre critères et/ou contraintes ont été envisagés, tout d'abord à un niveau général, puis en essayant de préciser ces relations.

D'une façon générale, la structure critériale identifiée à partir des commentaires des concepteurs (et proposée sur la figure 8) semble régie par des *relations de compatibilité et d'incompatibilité*: Ces relations peuvent en effet être mises en jeu entre:

- les éléments de solution et les contraintes, et rendre ainsi compte de l'activité d'évaluation de solutions;
- les contraintes entre elles et les critères entre eux.

Les relations de compatibilité et d'incompatibilité semblent ainsi se développer dans chacun des trois niveaux décrits (niveau des critères, niveau des contraintes, niveau de la représentation du problème et de sa solution) mais pas entre-niveaux. Les relations inter-niveaux identifiées apparaissent de nature différente: il s'agit de *relations de génération de contraintes*. L'origine de ces relations peut être les critères ou les spécifications du problèmes et leur aboutissant est la création de contraintes (respectivement de contraintes construites et de contraintes prescrites).

A un niveau plus fin, on peut chercher à préciser la nature des relations de compatibilité et d'incompatibilité et définir, par exemple (cf. figure 9):

- des liens de contradiction (qui précisent la relation d'incompatibilité)
exemple: "effectuer un développement" contredit "limiter le coût"
- des liens de contribution et des liens d'implication (qui précisent la relation de compatibilité)

exemple: "limiter le nombre d'éléments" ou "utiliser un matériau léger" contribuent à "limiter la masse"

exemples: "expérience industrielle" implique "faisabilité"

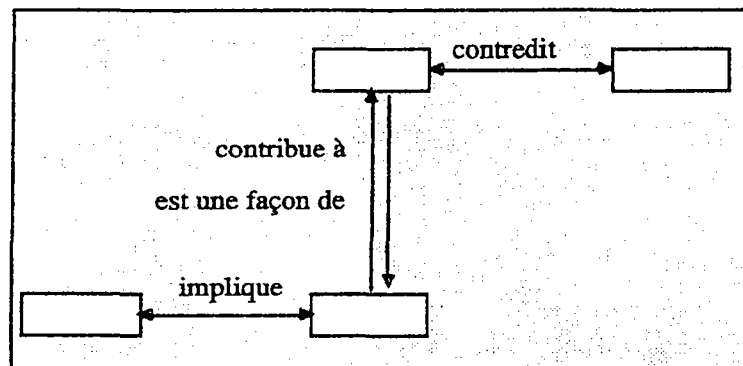


Figure 9: Liens entre critères et/ou contraintes

Une difficulté posée par l'identification de ces liens réside dans le fait qu'ils peuvent être formulés de plusieurs façons. Ainsi les liens de contribution et d'implication peuvent, en plus des formulations précédentes, donner lieu à des commentaires du type:

- "pour...on peut...", "une façon de...est de..." ou "un moyen de...consiste à...", qui s'appliquent à la contribution et rendent compte d'une possibilité.

exemples: pour limiter la masse, on peut limiter le nombre d'éléments

pour limiter la masse, on peut utiliser un matériau léger

une façon de limiter la masse est de limiter le nombre d'éléments

un moyen de limiter la masse consiste à utiliser un matériau léger

- "pour...il faut...", qui s'applique à l'implication et rend compte d'une nécessité, d'une condition ou d'un pré-requis.

exemple: "pour que la solution soit faisable, il faut disposer d'expérience industrielle"

CONCLUSION

Cette étude a eu pour objectif d'analyser les activités d'évaluation et de sélection de solutions. Une place importante a été accordée à leurs référents i.e. aux contraintes et aux critères (regroupés, lors de leur analyse, sous le terme d'attributs évaluatifs). Ils jouent en effet un rôle central dans les problèmes de conception où ils interviennent (directement ou non) dans les étapes les plus importantes: génération, évaluation et sélection de solutions. En outre, la définition de ces deux termes étant souvent confuse, quelques éléments distinctifs ont été proposés.

Des concepteurs différenciés (ingénieurs ou techniciens et expérimentés ou non dans le domaine des problèmes) ont été confrontés à deux types de problèmes (traditionnel et nouveau) et à leurs solutions. Ont pu être identifiées les stratégies d'évaluation et de sélection développées par les concepteurs, ainsi que les critères et les contraintes auxquels ils se réfèrent.

◊ Le niveau d'expertise et le type de tâche sont apparus comme des facteurs influençant l'évaluation de solutions mais leur influence s'est révélée dépendre du type de problème: le type de tâche influe sur le traitement du problème traditionnel, le niveau d'expertise influe sur le traitement du problème nouveau.

Les stratégies de sélection de solutions dépendent, elles aussi, du type de problème: une stratégie différente s'est révélée prépondérante pour chacun des problèmes.

◊ Les critères et contraintes utilisés lors de l'évaluation et de la sélection de solutions ont été identifiés. Ils ont été l'objet de plusieurs analyses dont les résultats présentent un intérêt pour la réalisation de systèmes d'aide à la décision et donnent lieu à des suggestions pour l'amélioration des systèmes experts critiques existants.

- Une analyse quantitative a montré que:

- 1) Une grande partie des attributs évaluatifs est commune aux deux problèmes. En généralisant ce résultat, ils paraissent réutilisables pour évaluer d'autres solutions du domaine aérospatial.

Un système d'aide intégrant ces critères et contraintes permettrait aux concepteurs de s'y référer pour évaluer plus "finement" les solutions. Ce système pourrait de plus intégrer certains critères (et/ou contraintes) spécifiques:

- au type de solutions (conceptuel vs physique), afin d'adapter l'évaluation des solutions à leur niveau de représentation;
- au type d'expertise et au niveau d'expertise des utilisateurs, afin que les explications fournies par le système soient adaptées aux utilisateurs.

2a) Confrontés à un problème nouveau, les concepteurs non expérimentés ne se réfèrent qu'à un nombre restreint de critères.

2b) Les concepteurs, même expérimentés, peuvent oublier certains critères lors du traitement des solutions (ce qui les amène à "revenir" sur des solutions déjà traitées ou à compléter la liste de critères qu'ils ont dû constituer).

Ces observations soulignent l'intérêt d'un système spécifiant aux concepteurs les critères à considérer pour effectuer un traitement exhaustif des solutions ou contrôlant qu'ils n'omettent aucun critère.

- Une analyse qualitative a corroboré les éléments de définition proposés pour les critères et les contraintes: ils se distinguent principalement par leur caractère conceptuel (critères) vs opérationnel (contraintes). Cette caractéristique distinctive explique le fait que les concepteurs expérimentés dans le domaine sont en mesure d'interpréter les critères de façon opérationnelle alors que les opérateurs non expérimentés peuvent éprouver des difficultés d'interprétation (difficultés pour appréhender les implications concrètes d'un concept). Ces remarques nous permettent de suggérer un mode de fonctionnement des systèmes experts critiques, adapté au niveau de compétence de l'utilisateur:

- avec un utilisateur "expert", les "critiques" de la solution pourraient n'inclure que les critères pertinents,
- avec un utilisateur "novice", les "critiques" de la solution devraient inclure à la fois les critères et les contraintes correspondantes.

Les contraintes sont reconnues comme intervenant directement dans la génération et l'évaluation de solutions. Le mode d'intervention des critères reste par contre à préciser même si certaines hypothèses peuvent être émises: situés à un niveau conceptuel, ils peuvent n'avoir qu'un rôle directeur lors de la génération de solutions mais intervenir directement dans l'évaluation et la sélection de solutions.

◊ L'analyse des commentaires des concepteurs a permis de reconstituer certaines relations existant entre les critères et/ou les contraintes. Une organisation en réseau a pu être suggérée ainsi que différents types de relations. Identifier plus précisément l'organisation et les liens entre critères et contraintes pourrait contribuer à améliorer l'évaluation de solutions lorsqu'elle est conduite par des concepteurs ou par des systèmes d'aides, ainsi qu'à améliorer les explications fournies par les systèmes à leurs utilisateurs.

REFERENCES

- Adelson, B. & Soloway, E. (1988). A Model of Software Design. In M.T.H. Chi, R. Glaser, M.S. Farr, *The Nature of Expertise*. Hillsdale, N-J: Erlbaum.
- Boissier, D. & Al-Hajjar, J. (1990). Logique floue et aide à la décision: Application à l'infrastructure des bâtiments. *Actes du Congrès OI.DESIGN*, Cabourg, 21-23 Octobre.
- Bonnardel, N. (1989). *L'évaluation de solutions dans la résolution de problèmes de conception*. (Rapport de Recherche INRIA 1072). Rocquencourt: INRIA.
- Bonnardel, N. (1990). L'effet du modèle de l'interlocuteur dans des dialogues de transfert de projet. *Actes du 2d Congrès Européen APPLICA'90*, Lille, 24-26 septembre.
- Chi, M.T.H., Feltovich, P.H. & Glaser, R. (1981). Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices. *Cognitive Science*, 5, 121-252.
- Clancey, W.J. (1977). An antibiotic therapy selector which provides for explanations. In *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence*.
- Darke, J. (1984). The primary generator and the design process. In Nigel Cross, Ed., *Developments in Design Methodology*. New-York: Wiley & Sons.
- Darses, F. (1990). *Gestion de contraintes au cours de la résolution d'un problème de conception de réseaux informatiques*. (Rapport INRIA 1164). Rocquencourt: INRIA.
- Guindon, R. (1990). Knowledge exploited by experts during software system design. *International Journal of Man-Machine Studies*, 33, 279-304.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: PUG.
- Janssen, P.; Jégou, P.; Nouguié, B. & Vilarem, M.C. (1989). Problèmes de conception: une approche basée sur la satisfaction de contraintes. *9èmes Journées Internationales: Les systèmes experts et leurs applications*, 29 mai-2 juin, vol.1, 71-84.
- Jeffries, R.; Turner, A.A.; Polson, P.G. & Atwood, M.E. (1981). The Processes Involved in Designing Software. In J.R. Anderson, *Cognitive skills and their acquisition*. Hillsdale, N-J: Erlbaum.
- Korf, R.E. (1980). Toward a Model of Representation Changes. *Artificial Intelligence*, 14, 41-78.
- Langlotz, C.P. & Shortliffe (1983). Adapting a Consultation System to Critique User Plans. *International Journal of Man-Machine Studies*, 19, 479-496.
- Lévine, P.; Pomerol, J.C. (1989). *Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision et Systèmes Experts*. Paris: Hermès.
- Malhotra, A.; Thomas, J.C.; Carroll, J.M. & Miller, L.A. (1980). Cognitive Processes in Design. *International Journal of Man-Machine Studies*, 12, 119-140.
- Miller, P.L. (1984). *A Critiquing Approach to Expert Computer Advice: ATTENDING*. Boston: Pitman Advanced Publishing Program.
- Newell, A. & Simon, H.A. (1972). *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- Richard, J.F. (1990). *Les activités mentales: comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Paris: Armand Colin.

- Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris: Economica.
- Shortliffe, E.H.; Scott, A.C., Bischoff, M.; Campbell, A.B.; Van Melle, W. & Jacobs, C. (1981). ONCOCIN: An expert system for oncology protocol management. In *Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vancouver, British Columbia, 876-881.
- Shortliffe, E.H. (1976). *Computer-based Medical Consultations: MYCIN*. New-York: Elsevier/North-Holland.
- Simon, H.A. (1973). The Structure of Ill Structured Problems. *Artificial Intelligence*, **4**, 181-201.
- Stefik, M. (1981). Planning with constraints (MOLGEN). *Artificial Intelligence*, **16**, 111-170.
- Verdret, P. (1989). *L'expertise en conception de programme: approche à partir de la notion de satisfaction de contraintes*. Thèse de 3ème cycle. Sophia-Antipolis: INRIA.
- Visser, W. & Bonnardel, N. (1989). *La résolution de problèmes lors de la conception d'une antenne. Analyse de l'activité*. (Rapport technique). Rocquencourt: INRIA.
- Zreik A & Zeitoun J (1990). Sur l'opérativité des concepts créatifs. *Actes du Congrès OI.DESIGN*, Cabourg, 21-23 Octobre.

ANNEXES

Annexe 1-a: Définition du problème traditionnel**A.C.U.****Exigences:**

- masse du satellite
- position du C. de G.
- interface satellite
- interface lanceur
- hauteur A.C.U.
- charges statiques
- charges dynamiques
- exigences fréquentielles
- métallisation des éléments mécaniques
- masse maximale
- date de livraison des modèles

Annexe 1-b: Description des solutions envisagées pour le problème traditionnel

Coque	matériaux	métal
		carbone
	concepts structuraux	monolithique
		monolithique raidi
		sandwich
Cadres		métallique
		carbone
Liaison		collage
		boulons ou rivets
		collage + boulons
		cadre intégré

Annexe 1-b: Description des solutions envisagées pour le problème traditionnel (suite)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
X	X												
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X		X	X	X	X	X	X	X					
	X								X	X	X	X	X
X		X	X	X					X	X	X	X	
					X	X	X	X					X
		X			X				X				X
X	X		X			X				X			
				X			X				X		
								X				X	

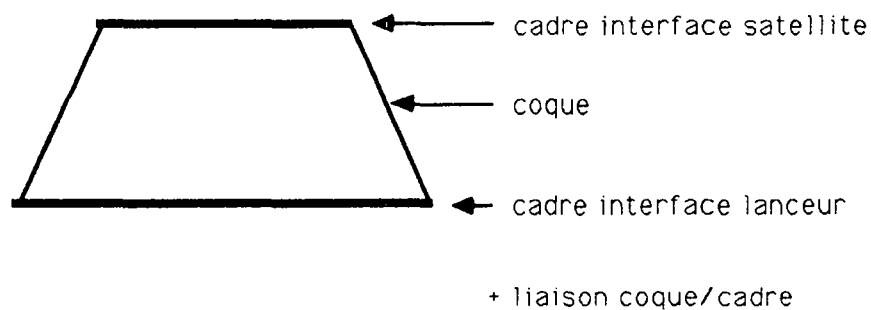
Annexe 1-b: Description des solutions envisagées pour le problème traditionnel (suite)

15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
X	X	X							
			X	X	X	X	X	X	X
			X	X	X				
X	X	X				X	X	X	X
			X			X			
X				X			X		
	X				X			X	
		X							X

Annexe 1-c: Explications du chef de service
 (explications non fournies aux concepteurs sujets de l'expérience)

A.C.U.

Constitution de l'A.C.U.



Coque

- matériau
 - métal (alliage d'aluminium)
 - carbone (haut module)
- concepts structuraux
 - monolithique
 - monolithique raidi
 - sandwich

Cadres

- métalliques (alliage d'aluminium)
- carbone

Liaison coque/cadres

- collage
- boulons ou rivets
- collage + boulons ou rivets
- cadre intégré à la coque

Annexe 2-a: Définition du problème nouveau

Réflecteur Reconfigurable

- dimension: \varnothing 1.6 m.
- profil proche d'un paraboloïde
écart maximum \approx 1 cm. / paraboloïde
- précision / surface théorique \approx 0.3 mm. RMS

Ce profil peut être modifié en orbite de façon à obtenir 3 ou 4 types de profils présélectionnés

On agit sur un certain nombre de points \approx 40 pour déformer la surface -> les déplacements à prévoir sont au maximum de 2 cm.

Pour produire ces déplacements -> mécanismes (moteurs électriques) qui produisent des déplacements linéaires suivant un axe

Réflecteur

structure porteuse + surface active déformable + mécanismes

Contraintes:

- surface active réfléchissante
- moteur faible effort latéral admissible: 0.1 kg. (1 N.)
- moteur limite d'effort axial: 1.5 kg. (15 N.)
- nombre d'actuateurs minimum

Annexe 2-b: Description des solutions envisagées pour le problème nouveau

- Solution 1: - réflecteur à tricot tendu sur une structure porteuse non déformable
 - décomposer la surface en "facettes"
 - fils indépendants pouvant glisser entre eux reliés à la structure porteuse par des éléments élastiques
- Solution 2: - réflecteur à tricot tendu sur une structure porteuse non déformable
 - décomposer la surface en "facettes"
 - fils souples
- Solution 3: - réflecteur à tricot tendu sur une structure porteuse non déformable
 - décomposer la surface en "facettes"
 - ne pas utiliser de fil
- Solution 4: - matériaux "moins souples" que le tricot (kevlar plis minces, kapton)
- Solution 5: - découpler l'axe du moteur de la surface sur laquelle il agit suivant les directions latérales (contact glissant ?...)
- Solution 6: - sandwich dont les semelles sont constituées d'un matériau souple

Annexe 3 : Les stratégies d'évaluation de solutions pour le problème traditionnel en fonction du niveau et du type d'expertise

Type d'expertise et niveau d'expertise	Ingénieur-Calculateur		Technicien-Dessinateur	
	Exp. pb. trad.	Non exp.pb.trad.	Exp. pb. trad.	Non exp.pb.trad.
Stratégies				
Stratégie 1 lecture et évaluation des solutions une à une	X ↓	X X X ↓ ↓ ↓	X X X ↓ ↓ ↓	X X ↓ ↓
Stratégie 2 lecture, évaluation des solutions une à une et recherche de similitudes			X X ↓ ↓	X ↓
Stratégie 3 lecture de toutes les solutions, catégorisation et évaluation par familles	X X ↓ ↓	X X X ↓ ↓ ↓	X ↓	X ↓
Stratégie 4 lecture de toutes les solutions et évaluation de leurs attributs		X X		X

Tableau I : L'effet du type d'expertise des concepteurs et de leur niveau d'expertise dans le domaine sur le type de stratégies d'évaluation des solutions du problème traditionnel

Annexe 4: Modélisation de l'activité d'évaluation et de sélection (agrandissement pages suivantes)

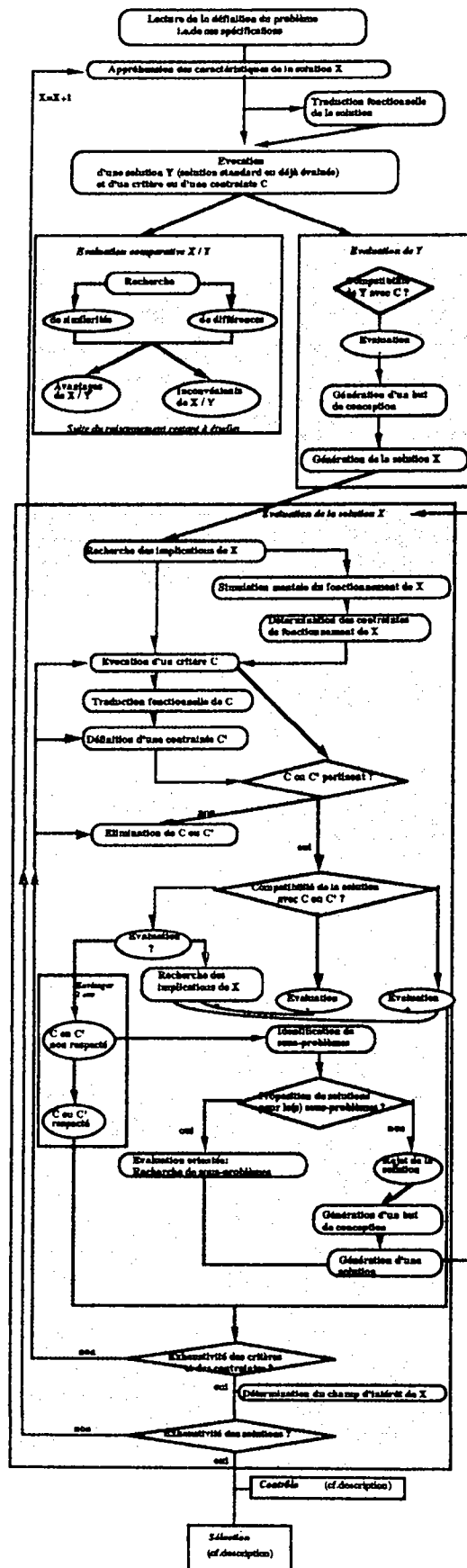
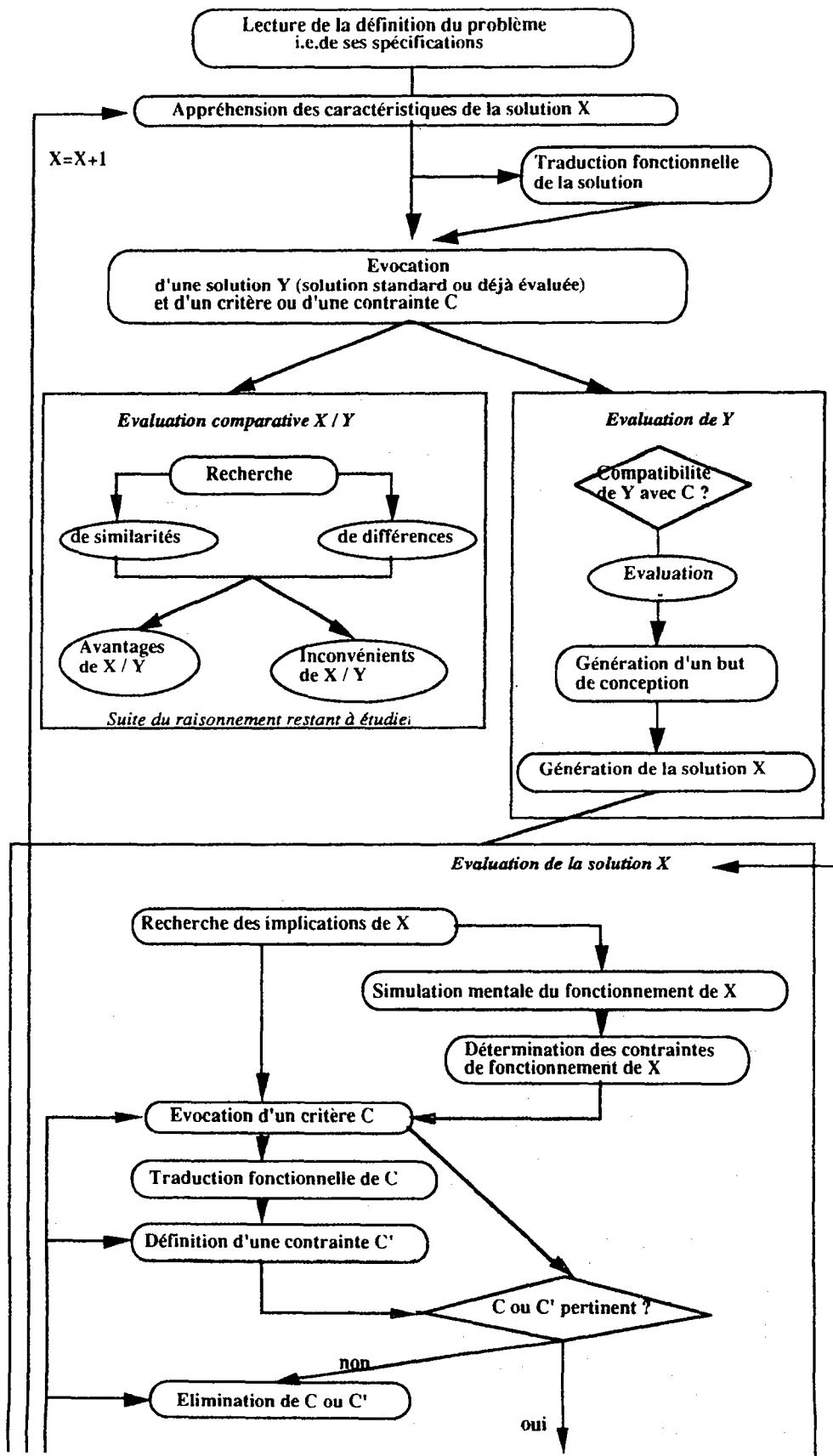
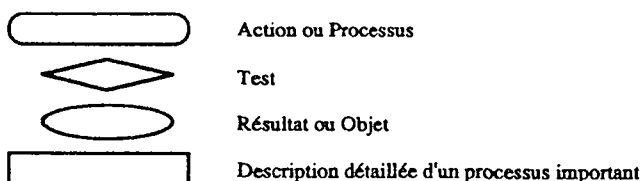


Figure 1: Éléments de modélisation de l'activité d'évaluation de solutions

Annexe 4 détaillée (a)



Légende



Annexe 4 (suite): Modélisation de l'activité d'évaluation et de sélection de solutions

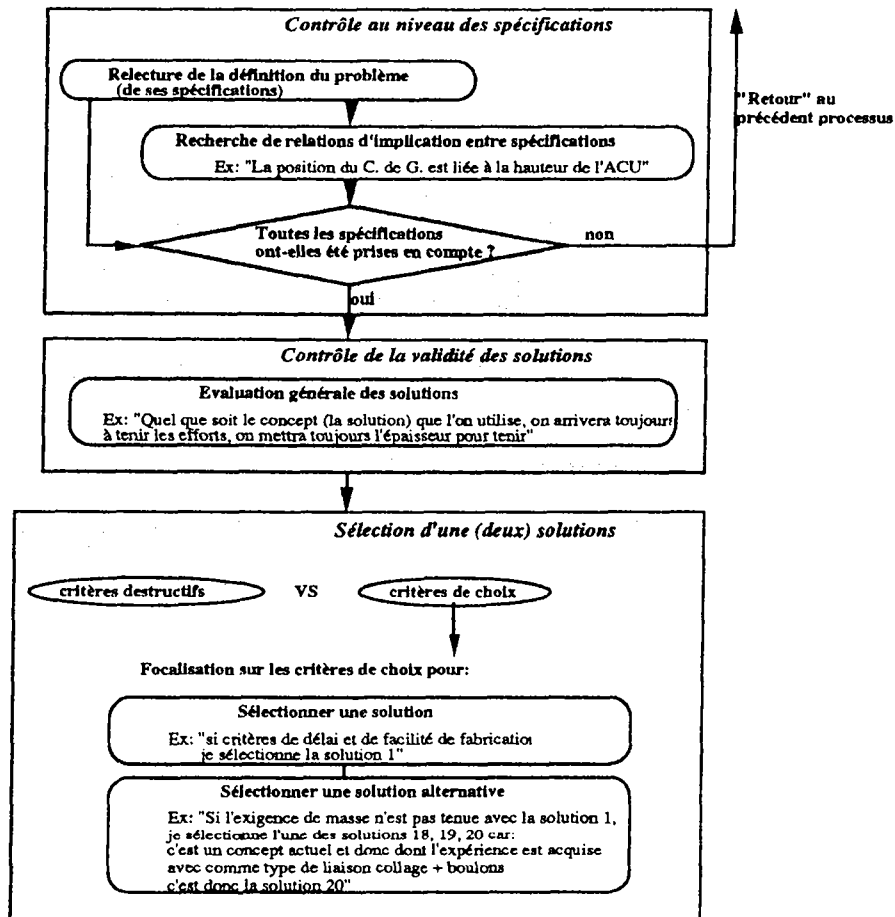
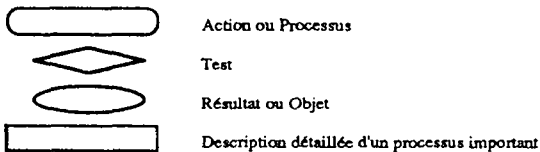


Figure 1 (suite): Eléments de modélisation de l'activité d'évaluation de solutions

Légende



Annexe 5: Expression de similitudes entre les solutions du problème traditionnel

Solutions Types de sujets	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Ing. Expérimentés	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ing. →Expérimentés	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dess. Expérimentés	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dess. →Expérimentés	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tableau II: L'effet du niveau et du type d'expertise sur l'expression de similitudes entre les solutions du problème traditionnelle

Légende:

— indique que les solutions présentent des similitudes

Annexe 6: Expression de similitudes entre les solutions du problème nouveau

Niveaux et types d'expertise	Expression de similitudes	Solutions					
		1	2	3	4	5	6
Ingénieurs - Calculateurs Expérimentés							
1	—						
2	+	_____		_____			
3	+	_____		_____	X		
4	+	_____		_____X			
—Expérimentés							
1	+	_____		_____X			
2	+	_____		X			
3	+	_____		X			
4	+	_____		X			
Techniciens - Dessinateurs Expérimentés							
1	—						
2	+	_____		X			
—Expérimentés							
1	—	X					
2	—						
3	—						
4	—	X					

Tableau III L'effet du niveau et du type d'expertise sur l'expression de similitudes entre les solutions du problème nouveau.

Légende:

—+— similitudes reposant sur l'attribut "présence (ou non) du tricot"

—+*— similitudes reposant sur l'attribut "présence (ou non) de fils"

— absence d'expression de similitudes par le concepteur

————— ou [—————] représentent les regroupements de solutions effectués par les sujets

X indique que la solution correspondante a été estimée comme ne constituant pas une solution à part entière

Annexe 7: Illustration des stratégies de sélection de solutions pour le problème nouveau

Trois modes de sélection de solution ont été identifiés dont un, employé fréquemment, a été décrit. Les deux autres modes de sélection sont présentés et exemplifiés ci-dessous.

1 - Prendre en compte certains critères pour sélectionner certaines solutions puis sélectionner l'une des solutions retenues

Cette stratégie est mise en œuvre par l'un des ingénieurs expérimentés dans le domaine. Il prend en considération le critère qu'il juge le plus important (la "fiabilité" de la solution), le traduit d'une façon fonctionnelle i.e. sous la forme d'une contrainte construite ("le moins de moteurs et de mécanismes possible"). Sur cette base, il sélectionne deux solutions satisfaisant cette contrainte et envisage alors leur condition d'application ("basse fréquence" pour l'une d'elles, "haute fréquence" pour l'autre). Il évoque ensuite un autre critère ("la rigidité globale") qu'il évalue comme peu pertinent pour trancher entre les deux solutions retenues. Aussi, évoque-t-il un troisième critère plus pertinent ("la compacité de l'antenne") qui lui permet de sélectionner l'une des deux solutions. Il confirme finalement son choix en évaluant la solution en fonction d'un quatrième critère (la "versatilité").

2 - Prendre en compte certains critères pour éliminer la(les) solutions les moins satisfaisantes et parvenir à la sélection de la solution la plus satisfaisante

Cette stratégie est mise en œuvre par les deux dessinateurs expérimentés dans le domaine:

- L'un d'eux commence par se référer au critère qu'il estime le plus important (la "faisabilité") ce qui lui permet d'éliminer la solution la moins satisfaisante. Il s'intéresse ensuite aux autres critères, en fonction de leur importance relative (le "coût" puis le respect de la contrainte prescrite "nombre minimum d'actuateurs"), et se faisant élimine les solutions qui ne les satisfont pas. Il aboutit ainsi à la sélection de la solution la plus satisfaisante et confirme son choix en évoquant un quatrième critère et en se référant de nouveau à un critère considéré lors de l'élimination des solutions précédentes.
- Le second dessinateur expérimenté rend compte d'un raisonnement similaire au précédent: il élimine tout d'abord une solution ("non comprise") puis évoque deux critères qu'il juge les plus importants (la "précision de la déformation demandée" et la "masse") et qui lui permettent de sélectionner directement la solution la plus satisfaisante eu égard à ces critères. Il confirme ensuite son choix en mentionnant les avantages de la solution et en évoquant des critères supplémentaires ("accès à pratiquement tous les types de déformation" -> versatilité; "nombre minimum d'actuateurs" -> "gain de masse"; "simplicité des liaisons tricot/fils/actuateurs"). Il propose finalement une solution alternative en associant la solution sélectionnée et une autre extraite de celles proposées.

Annexe 8-a: Illustration d'une démarche d'élaboration de solution

Une alternative à la tâche de sélection a été observée: l'élaboration d'une solution nouvelle (cf. Figure II, annexe 8-b)

Ce processus est mis en œuvre par l'un des 14 sujets. Il s'agit d'un dessinateur inexpérimenté dans le domaine des réflecteurs mais expérimenté dans celui des A.C.U. Il n'a sélectionné aucune des solutions proposées mais en a élaboré une nouvelle. Pour cela, il définit une contrainte à partir d'une analyse du problème et de ses spécifications (contrainte déduite: "éviter de mettre 40 moteurs"). Elle va jouer un rôle d'orientation de l'attention et aboutir à la formulation d'un but ("essayer de commander plusieurs points à la fois"). Le concepteur élabore alors une solution ("utiliser des fils avec des renvois et un tambour étagé et moteur"). Il réalise des dessins schématisant la solution ce qui lui permet d'évaluer plus facilement cette solution et de définir d'autres contraintes (contraintes déduites de l'état de la solution). Elles participent à la formulation d'un nouveau but de conception ("avoir un diamètre de tambour non linéaire") et orientent ainsi le développement de la solution. Le concepteur se réfère ensuite à d'autres contraintes prescrites ("diamètre de 1.6 m.") qu'il évalue et dont il envisage les implications techniques. Cela lui permet d'éliminer un élément de solution "standard" ("utiliser un tricot") et donc évoqué d'emblée: "pas de tricot sur un diamètre si petit". Pour optimiser sa solution, il porte son attention sur une autre contrainte (liée aux performances de réflexion). Le but de conception qui en découle définit alors les conditions nécessaires ("disposer d'une surface continue lisse").

Annexe 8-b: Processus d'élaboration d'une solution

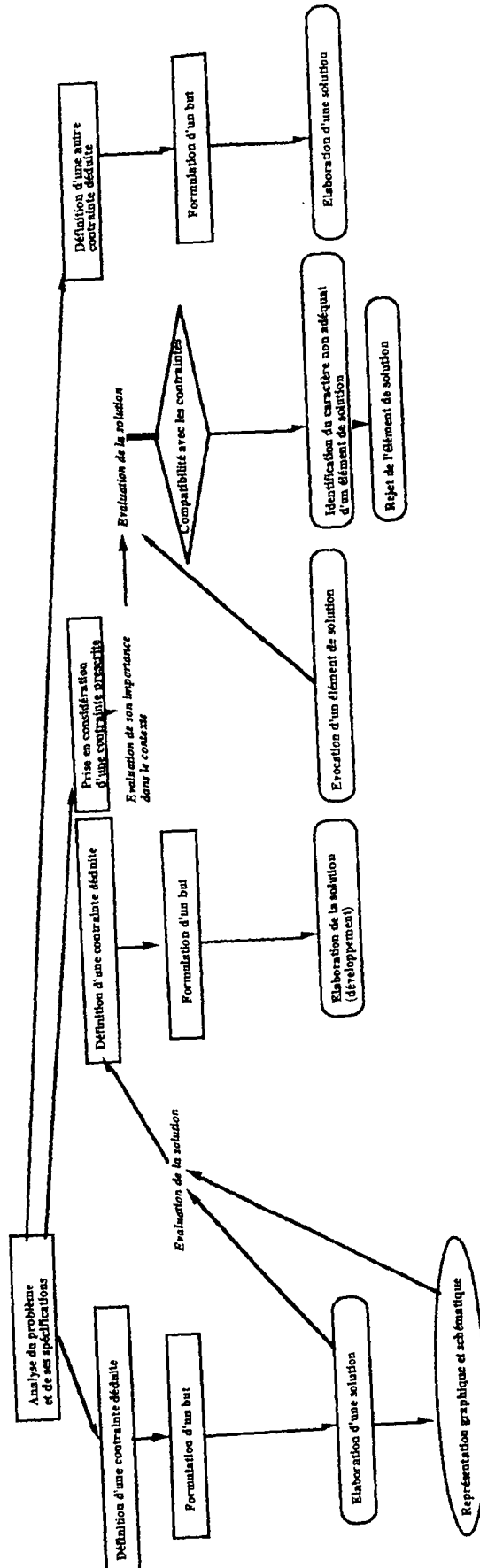
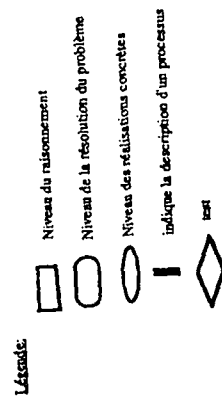


Figure II: Les étapes d'élaboration d'une solution nouvelle



Annexe 9: Effectif de concepteurs citant les critères et les contraintes

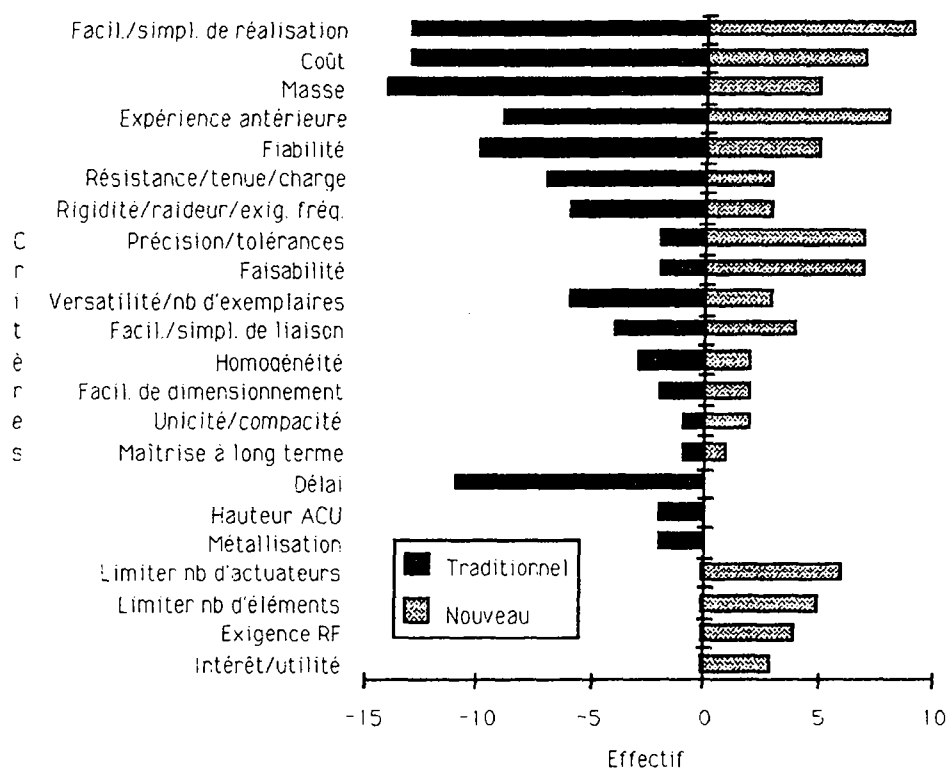


Figure III: L'effet du type de problème sur l'effectif de concepteurs citant les critères et les contraintes.

Annexe 10: Justifications des solutions sélectionnées pour le problème traditionnel

Niveau d'expertise	Solutions sélectionnées		Type d'expertise (modalité 1)	Solutions sélectionnées		Type d'expertise (modalité 2)
	1er choix	2d choix	Ingénieurs - Calculateurs	1er choix	2d choix	Techniciens - Dessinateurs
Expérimentés ACU	5	3 20	diminution des coûts diminution des risques diminution des coûts diminution des risques si délai restreint	2	20	si contrainte de masse peu impte si contrainte de masse impte diminution des risques
				19	1	expce acquise expce acquise
	1	20	délai restreint simplicité de réalisation si contrainte de masse impte expce acquise	24	1	si nbre d'exemplaires restreint diminution des coûts si nbre d'exemplaires restreint si délai restreint si contrainte de masse peu impte
Non expérimentés ACU	2	5 20	si délai restreint si contrainte de masse impte expce acquise	20	1	charges à supporter + imptes gain de masse si contrainte de résistance impte si contrainte de masse peu impte
	1 & 2	20	expce acquise délai restreint expce acquise bon compromis coût/perf en masse	2	20	si nbre d'exemplaires restreint si nbre d'exemplaires impt
				24	9	si nbre d'exemplaires impt si contrainte de masse impte simplicité de réalisation
	18	1	versatilité possibilité d'hauteur ACU impte expce acquise si faible hauteur ACU expce acquise			
	20	--	versatilité si contrainte masse impte expce acquise fiabilité-sécurité			
	19	--	rapport masse/résistance			
	20	--	diminution de la masse rapport masse/rigidité bonne liaison bonne géométrie facilité de mise en oeuvre précision			

Tableau IV: L'effet du niveau et du type d'expertise sur les solutions sélectionnées pour le problème traditionnel et sur les justifications fournies

Annexe 11: Justifications des solutions sélectionnées pour le problème nouveau

Niveau d'expertise	Solutions sélectionnées	Type d'expertise (modalité 1) Ingénieurs - Calculateurs	Solutions sélectionnées	Type d'expertise (modalité 2) Techniciens - Dessinateurs
Expérimentés Réflecteurs	1	diminution des risques précision (du profil) versatilité	2	versatilité diminution du nombre d'actuateurs diminution de la masse expce acquise
	1	expce acquise limitation du nombre d'éléments faisabilité facilité de calcul		
	4	versatilité compacité de l'antenne rigidité fiabilité	1	précision (du profil) limitation du nombre d'éléments
	4	expérience acquise homogénéité de la déformée		
Non Expérimentés Réflecteurs	3	expérience acquise limitation du nombre d'éléments diminution des risques	3	bonne maîtrise de la déformée
	2	expérience acquise diminution des risques	5	simplicité de réalisation
			nouvelle	
	3	efforts (suppression de l'effort latéral)	1	expérience acquise diminution de la masse diminution des coûts nbre mini. d'actuateurs
	4	homogénéité de la déformée facilité de calculs		

Tableau V: L'effet du niveau et du type d'expertise sur les solutions sélectionnées pour le problème nouveau et sur les justifications fournies

ISSN 0249 - 6399